



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RF141501

IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI LAPANGAN “SK” BERDASARKAN NILAI RESISTIVITAS HASIL PEMODELAN INVERSI 1D DAN 2D DATA MAGNETOTELURIK

ANDRE MARIES JASMAN
NRP. 3714100055

Dosen Pembimbing
Wien Lestari, S.T, M.T.
NIP. 19811002 201212 2003
Dr. Widya Utama, DEA.
NIP. 19611024 198803 1001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RF141501

IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI LAPANGAN “SK” BERDASARKAN NILAI RESISTIVITAS HASIL PEMODELAN INVERSI 1D DAN 2D DATA MAGNETOTELURIK

ANDRE MARIES JASMAN
NRP. 3714100055

Pembimbing:
Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2003
Dr. Widya Utama, DEA.
NIP. 19611024 198803 1001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - RF141501

***GEOHERMAL SYSTEM IDENTIFICATION OF “SK”
FIELD BASED ON RESISTIVITY VALUE 1D AND 2D
INVERSION MODELLING RESULTS OF
MAGNETOTELLURIC DATA***

ANDRE MARIES JASMAN
NRP. 3714100055

Advisors:

Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2003
Dr. Widya Utama, DEA.
NIP. 19611024 198803 1001

DEPARTMENT OF GEOPHYSICAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

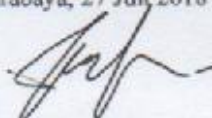
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan penulisan Tugas Akhir yang berjudul "Identifikasi Sistem Panas Bumi Lapangan 'SK' Berdasarkan Nilai Resistivitas Hasil Pemodelan Inversi 1D dan 2D Data Magnetotellurik" adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka

Apabila pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku

Surabaya, 27 Juli 2018



Andre Maries Jasman

NRP. 3714100055

(Halaman ini sengaja dikosongkan)




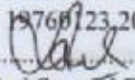
**IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI LAPANGAN "SK"
BERDASARKAN NILAI RESISTIVITAS HASIL
PEMODELAN INVERSI 1D DAN 2D DATA
MAGNETOTELURIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Surabaya, 27 Juli 2018

Menyetujui,

- | | |
|--|-----------------|
|

1. Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2 003 | (Pembimbing I) |
|

2. Dr. Widya Umbara, DEA
NIP. 19611024 198803 1 001 | (Pembimbing II) |
|

3. Dr. Dwa Desa Warnana
NIP. 19760723 200003 1 001 | (Penguji I) |
|

4. Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si., M.T.
NIP. 19690906 199702 1 001 | (Penguji II) |

Mengetahui,
Kepala Laboratorium Petrofisika
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya



Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2 003

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI LAPANGAN “SK” BERDASARKAN NILAI RESISTIVITAS HASIL PEMODELAN INVERSI 1D DAN 2D DATA MAGNETOTELURIK

Nama Mahasiswa : Andre Maries Jasman
NRP : 3714100055
Departemen : Teknik Geofisika
Dosen Pembimbing : Wien Lestari, S.T., M.T.
Dr. Widya Utama, DEA.

ABSTRAK

Lapangan panas bumi “SK” berada pada zona vulkanik yang didominasi oleh lava andesit-basaltik dan jatuhan piroklastik. Daerah ini memiliki potensi panas bumi ditandai dengan kemunculan manifestasi panas bumi berupa *steam ground*, air panas, dan fumarol. Pengolahan data magnetotelurik lapangan panas bumi “SK” dilakukan dengan tahapan sebagai berikut: FFT, *robust processing*, *cross power correction*, *static shift correction*, inversi 1D Occam, *cross section modelling*, inversi 2D NLCG, dan pendekatan model 2D dengan 1D untuk menghilangkan efek galvanik pada lapisan dangkal. Hasil pemodelan diintegrasikan dengan data geologi untuk diinterpretasi. Sistem panas bumi lapangan “SK” berada pada wilayah formasi Lava “B3” yang terdiri dari lapisan *cap rock* dengan nilai resistivitas 5-20 Ωm pada kedalaman 1000-2000 meter, lapisan *reservoir* dengan nilai resistivitas 150-350 Ωm di kedalaman 2000-2500 meter dan terdapat kelurusan sesar di wilayah di wilayah titik MTKM-19 dan MTKM-26 yang terlihat pada kontras resistivitas berdasarkan hasil pemodelan.

Kata Kunci : *Galvanik, Magnetotelurik, NLCG, Occam, Resistivitas.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**GEOTHERMAL SYSTEM IDENTIFICATION OF “SK”
FIELD BASED ON RESISTIVITY VALUE 1D AND 2D
INVERSION MODELLING RESULTS OF
MAGNETOTELLURIC DATA**

Name : Andre Maries Jasman
NRP : 3714100055
Department : Geophysical Engineering
Advisor Lecture : Wien Lestari, S.T., M.T.
Dr. Widya Utama, DEA.

ABSTRACT

The "SK" geothermal field is in a volcanic zone dominated by andesite-basaltic lava and pyroclastic fall. This area has geothermal potential characterized by the appearance of geothermal manifestations of steam ground, hot water, and fumaroles. Geothermal magnetotelluric data processing "SK" is done with the following stages: FFT, robust processing, cross power correction, static shift correction, 1D Occam inversion, cross section modelling, 2D inversion NLCG, and 2D model approach with 1D to eliminate effects galvanic in shallow layers. The final modeling results are integrated with geological data to be interpreted. The "SK" field geothermal system is in the "B3" Lava Formation region consist of a cap rock layer with a resistivity value of 5-20 Ωm at a depth of 1000-2000 meters, a reservoir layer with a resistivity value of 150-350 Ωm at depths from 2000 to 2500 meters and there is a fault in MTKM-19 and MTKM-26 areas seen in contrast resistivity based on the modeling results.

Keywords : Galvanic, Magnetoteluric, NLCG, Occam, Resistivity.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

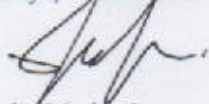
Puji syukur kepada Allah SWT karena dengan rahmat dan ridho-Nya laporan tugas akhir dengan judul "Identifikasi Sistem Panas Bumi Lapangan "SK" Berdasarkan Nilai Resistivitas dari Hasil Pemodelan Inversi 1D dan 2D Data Magnetotelurik" dapat terselesaikan.

Penyelesaian ini tentunya juga melibatkan berbagai pihak selain penulis. Dalam penulisan maupun proses pelaksanaan tidak terlepas dari bimbingan, saran dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih pada :

- 1 Bapak Jasman dan Ibu Mardiah sebagai orang tua penulis yang senantiasa memberikan dukungan material maupun moril pada pengerjaan tugas akhir ini.
- 2 Ibu Wien Lestari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 1 yang senantiasa memberikan saran dan bimbingan dari sebelum hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini.
- 3 Bapak Dr. Widya Utama, DEA. selaku dosen pembimbing 2 sekaligus kepala Departemen Teknik Geofisika ITS yang senantiasa memberikan saran dan bimbingan dari sebelum hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini.
- 4 Bapak Iqbal Takodama, S.T. selaku pembimbing pengerjaan tugas akhir di Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) beserta seluruh praktisi bidang panas bumi PSDMBP yang memberikan himbangan selama pengerjaan tugas akhir.
- 5 Teman-teman Departemen Teknik Geofisika ITS yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan pada pengerjaan tugas akhir ini.
- 6 Seluruh pihak yang senantiasa membantu saya baik secara moril maupun materil yang tidak dapat dituliskan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa pengembangan keilmuan tidak berhenti pada suatu hasil. Kritik, saran maupun diskusi diperlukan agar kebermanfaatan laporan tugas akhir ini semakin dirasakan pembaca maupun pribadi penulis.

Surabaya, 27 Juli 2018



Andre Maries Jasman

NRP. 3714100055

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Studi Literatur	5
2.1.1 Pemodelan 1D Data Magnetotelurik	5
2.1.2 Pemodelan 2D Data Magnetotelurik	6
2.1.3 Pendekatan Hasil Pemodelan 1D dengan 2D untuk Mengurangi Efek Galvanik	7
2.2 Dasar Teori.....	9
2.2.1 Geologi Regional Lapangan Panas Bumi “SK”	9
2.2.2 Sistem Panas Bumi.....	10
2.2.3 Metode Magnetotelurik	11
2.2.4 Persamaan Maxwell	13
2.2.5 Tahanan Jenis Semu	16
2.2.6 <i>Skin Depth</i>	17
2.2.7 Impedansi	17

2.2.8 <i>Transverse Electric</i> dan <i>Transverse Magnetic</i>	19
2.2.9 Inversi <i>Occam</i> 1D	21
2.2.10 Inversi 2D <i>Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)</i>	24
2.2.11 Resistivitas Batuan.....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Jadwal Kegiatan.....	29
3.2 Desain Akuisisi Data	30
3.3 Diagram Alir	32
3.3.1 <i>Fast Fourier Transform (FFT)</i> dan <i>Robust Processing</i> Menggunakan Perangkat Lunak <i>SSMT 2000</i>	33
3.3.2 <i>Crosspower Correction</i> Menggunakan Perangkat Lunak <i>MT-Editor</i>	36
3.3.3 <i>Smoothing</i> Data Tahap Lanjut dan <i>Static Shift Correction</i> Pada Perangkat Lunak <i>WinGLink</i>	40
3.3.4 Pemodelan 1D Metode <i>Occam</i>	45
3.3.5 Pemodelan 2D Metode <i>Non-Linear Conjugate Gradient</i> (<i>NLCG</i>).....	49
3.3.5.1 <i>Forward Modelling 2D</i>	49
3.3.5.1 Metode <i>L'Curve</i>	50
3.3.6 Pendekatan Hasil Pemodelan 1D dan 2D	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	59
4.1 Hasil Pemodelan <i>Line 1</i>	59
4.2 Hasil Pemodelan <i>Line 2</i>	62
4.3 Interpretasi.....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	73
PROFIL PENULIS	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pemodelan 1D dengan Metode <i>Occam</i> dan <i>Simulated Annealing</i> (Wijaya dkk., 2016).....	5
Gambar 2. 2 Hasil Pemodelan 2D dengan Metode NLCG (Syahwanti dkk., 2014).....	6
Gambar 2. 3 Efek Galvanik Pada Pemodelan 2D (Wibowo, 2013).	7
Gambar 2. 4 Hasil Pendekatan Model 1D dan 2D (Wibowo, 2013).....	8
Gambar 2. 5 Peta Geologi Lapangan Panas Bumi “SK” (PSDMBP, 2012).....	9
Gambar 2. 6 Sistem Panas Bumi (Dipipo, 2005).	11
Gambar 2. 7 Dua Jenis Sumber Gelombang Magnetotelurik. a) Solar Wind, b) <i>Lightning Discharge</i> (Kauffman dan Keller, 1981).	12
Gambar 2. 8 Prinsip Dasar Metode Magnetotelurik (Vozoff, 1986).	12
Gambar 2. 9 Model 2 Dimensi dengan Polarisasi <i>E</i> dan <i>B</i> dengan Arah Strike <i>x</i> (Simpson dan Bahr, 2005).	20
Gambar 2. 10 Hasil Pemodelan Inversi 2D Data Sintetik Magnetotelurik Komponen TM (atas) dan TE (bawah) (Grandis, 2009).	21
Gambar 2. 11 Hasil Pemodelan Inversi 2D Data Sintetik Magnetotelurik yang Merupakan Gabungan Antara Komponen TM dan TE (Grandis, 2009).....	21
Gambar 2. 12 Perbandingan Hasil Pemodelan 1D Metode <i>Non-Linear</i> , <i>LM Solution</i> dan <i>Occam</i> (Aster dkk., 2005).	22
Gambar 2. 13 Model 2D Dimensi yang didiskritkan dengan <i>Finite Difference</i> (Grandis, 2009).	24
Gambar 3. 1 Grafik Kumulatif Rencana dan Realisasi.	30
Gambar 3. 2 Desain Akuisisi Data Magnetotelurik Lapangan Panas Bumi “SK” Berdasarkan Pemetaan Citra Satelit Setelah di <i>Overlay</i> dengan Peta Geologi Regional.	31
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data Magnetotelurik.	32
Gambar 3. 4 Tampilan Awal Perangkat Lunak <i>SSMT2000</i>	33
Gambar 3. 5 <i>Setting</i> Parameter FFT.	34
Gambar 3. 6 <i>Setting</i> Parameter <i>Robust Processing</i>	35
Gambar 3. 7 <i>Robust Processing</i>	36
Gambar 3. 8 Data dengan <i>Error Bar</i> Tinggi.....	37
Gambar 3. 9 Kondisi Data Pada Frekuensi 10^{-2}	38
Gambar 3. 10 Kurva TE (hijau) dan TM (kuning) Sebelum (atas) dan Sesudah (bawah) Proses <i>Crosspower Correction</i>	39
Gambar 3. 11 Data dengan Kondisi yang Tidak Ideal	40
Gambar 3. 12 Tampilan Awal Perangkat Lunak <i>WinGLink</i>	40
Gambar 3. 13 Peta Elevasi Lintasan.	41
Gambar 3. 14 Kurva TE (merah) dan TM (biru) Sebelum <i>Smoothing</i> dan <i>Static Shift Correction</i>	42
Gambar 3. 15 <i>Setting</i> Parameter <i>Smoothing</i>	43

Gambar 3. 16 Kurva TE (merah) dan TM (biru) Setelah <i>Smoothing</i> dan <i>Static Shift Correction</i> .	44
Gambar 3. 17 <i>Setting</i> Parameter Pemodelan <i>Occam</i> 1D.	45
Gambar 3. 18 Hasil Pemodelan <i>Occam</i> 1D.	46
Gambar 3. 19 <i>Setting</i> Penentuan Nilai Resistivitas dan Kedalaman Pemodelan 1D.	47
Gambar 3. 20 Hasil Akhir Pemodelan Inversi 1D Metode <i>Occam</i> .	48
Gambar 3. 21 Hasil <i>Cross Section</i> Pemodelan 1D.	48
Gambar 3. 22 Model Awal Penampang Resistivitas 2D.	49
Gambar 3. 23 <i>L'Curve Line 1</i> (atas) dan <i>Line 2</i> (bawah).	51
Gambar 3. 24 Hasil Pemodelan 2D Metode NLCG.	52
Gambar 3. 25 Perbandingan Kurva Pemodelan 1D (kiri) dan Kurva Misfit 2D (kanan) Titik MTKM-19 dan MTKM-20.	53
Gambar 3. 26 Perbandingan Hasil <i>Cross Section</i> (atas) dengan Model 2D (bawah) <i>Line 1</i> .	54
Gambar 3. 27 Perbandingan Kurva Pemodelan 1D (kiri) dan Kurva <i>Misfit</i> 2D (kanan) Titik MTKM-24 dan MTKM-26.	55
Gambar 3. 28 Perbandingan Hasil <i>Cross Section</i> (atas) dengan Model 2D (bawah) <i>Line 2</i> .	56
Gambar 3. 29 Hasil Model 2D Setelah Pendekatan Dengan Model 1D <i>Line 1</i> (atas) dan <i>Line 2</i> (Bawah).	57
Gambar 4. 1 Hasil pemodelan 1D <i>Line 1</i> .	59
Gambar 4. 2 Hasil <i>Cross Section Line 1</i> .	60
Gambar 4. 3 Hasil Pemodelan 2D <i>Line 1</i> .	61
Gambar 4. 4 Hasil pemodelan 1D <i>Occam Line 2</i> .	62
Gambar 4. 5 Hasil <i>Cross Section Line 2</i> .	63
Gambar 4. 6 Hasil Pemodelan 2D <i>Line 2</i> .	64
Gambar 4. 7 Interpretasi Hasil Pemodelan 2D <i>Line 1</i> (Atas) dan <i>Line 2</i> (Bawah)	65
Gambar 4. 8 Gabungan Model 2D <i>Line 1</i> dan <i>Line 2</i> dalam Bentuk Volumetrik.	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai Resistivitas Batuan (Telford dkk., 1990).....	26
Tabel 3. 1 <i>Timeline</i> Pengerjaan dan Penyusunan Tugas Akhir	29
Tabel 3. 2 Data Hasil Pengukuran TDEM.....	44
Tabel 3. 3 Perbandingan nilai <i>RMS</i> , <i>Roughness</i> , dan <i>Objective</i> Sebagai Parameter <i>L'Curve</i>	50

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi masa depan. Salah satu pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia adalah sebagai energi listrik untuk penerangan. Potensi energi panas bumi yang dimiliki Indonesia merupakan terbesar di dunia. Saat ini, Indonesia baru menghasilkan sebanyak 1.348 MWe tenaga listrik panas bumi atau sekitar 4,71% dari total potensi energi panas bumi yang dimiliki. Indonesia menjadi negara keempat di dunia yang mengembangkan listrik dengan menggunakan tenaga panas bumi setelah Amerika Serikat, Guatemala, dan Filipina. Maka, di masa datang, seharusnya Indonesia dapat memainkan peran dalam pemanfaatan energi panas bumi untuk daya listrik (Gaffar dkk., 2007). Berdasarkan kajian Badan Geologi tahun 2012, dari sebanyak 299 lokasi lapangan panas bumi yang ada terdapat total potensi energi dari panas bumi sebesar 28.617 MWe. Jumlah potensi tersebut dibagi ke dalam dua kelas sumber daya dan tiga kelas cadangan, yaitu sumber daya spekulatif sebanyak 7.247 MWe (25,32%) dan sumber daya hipotetik sebesar 4.886 MWe (17,07%), cadangan terduga sejumlah 13.373 MWe (46,73%), cadangan mungkin 823 MWe (2,88%), dan cadangan terbukti sebesar 2.288 MWe (8,00%) (Daud, 2010).

Energi panas bumi tidak lepas kaitannya dengan ilmu kebumihan, termasuk bidang geofisika. Fenomena arus telurik digunakan dalam aplikasi kebumihan melalui metode magnetotelurik. Dalam metode ini, arus telurik digunakan sebagai sumber untuk menginduksi material bawah permukaan untuk memperoleh informasi struktur konduktivitas bawah permukaan (Kauffman dan Keller, 1981). Metode magnetotelurik merupakan metoda eksplorasi geofisika yang diandalkan dalam eksplorasi panas bumi karena memiliki jangkauan kedalaman yang cukup besar hingga ratusan kilometer (Grandis, 2013).

Salah satu solusi untuk mengetahui struktur bawah permukaan menggunakan data magnetotelurik dapat dilakukan dengan pemodelan 1D metode *Occam*. Metode *Occam* 1D dapat menunjukkan hasil pemodelan yang lebih baik berdasarkan *RMS error* dan kesesuaian model (Wijaya dkk., 2016). Selain itu, pemodelan data magnetotelurik juga dapat dilakukan dengan pemodelan 2D dengan metode *Non Linear Conjugate Gradient* (NLCG). Berdasarkan data pemetaan resistivitas bawah permukaan dari hasil pemodelan 2D tersebut, selanjutnya akan diketahui perkiraan mengenai susunan sistem panas bumi yaitu *reservoir* panas bumi, lokasi *cap rock* dan lokasi komponen sistem panas bumi lainnya di bawah permukaan (Syahwanti dkk., 2014). Pengolahan data magnetotelurik dapat dilakukan dengan perangkat lunak konvensional *WinGLink*.

Pada perangkat lunak *WinGLink*, pemodelan dapat dilakukan dengan metode *Occam* untuk 1D, dan metode *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)* untuk 2D. Inversi *Occam* merupakan suatu bentuk metode inversi yang memanfaatkan tingkat kekasaran model sehingga hasilnya tidak bergantung pada estimasi awal (Aster dkk., 2005). Karena itu, inversi *Occam* 1D menghasilkan kurva pemodelan 1D yang *smooth* dan sesuai dengan bentuk kurva yang dimodelkan. Kemudian, untuk pemodelan 2D metode *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)* dilakukan dengan *forward modelling* lapangan pengukuran dengan resistivitas homogen sebagai model awal sebelum dilakukan pemodelan inversi. Hasil pemodelan 2D metode *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)* memiliki kelemahan untuk mengidentifikasi lapisan dangkal. Hal ini dipengaruhi karena data magnetotelurik tidak begitu stabil pada lapisan dangkal yang disebabkan oleh perbedaan topografi yang mencolok. Pemodelan 2D NLCG tidak dapat menggambarkan topografi dengan baik karena hanya dapat membuat model dengan *grid* yang sama (Zakaria, 2013). Pada lapisan dangkal tersebut akan menimbulkan efek galvanik yang menyebabkan terjadinya penyimpangan nilai resistivitas. Hasil pemodelan 1D dapat digunakan sebagai pendekatan untuk hasil pemodelan 2D untuk mengurangi efek galvanik tersebut agar didapatkan model 2D yang optimal (Wibowo, 2013).

Sistem panas bumi memiliki lima komponen utama, yaitu *heat source*, struktur geologi, *cap rock*, *reservoir* dan fluida (Dipipo, 2005). Daerah yang memiliki prospek panas bumi biasanya terdapat manifestasi di sekitar daerah tersebut. Studi kasus pada penelitian ini adalah daerah lapangan panas bumi “SK”. Ditinjau dari data geologi, daerah ini berada pada zona vulkanik yang didominasi oleh lava andesit-basaltik dan jatuhnya piroklastik. Daerah ini diduga memiliki prospek panas bumi yang ditandai dengan kemunculan manifestasi panas bumi berupa, *steam ground*, air panas, dan fumarol. Berdasarkan data akuisisi magnetotelurik lapangan panas bumi “SK”, penulis ingin melakukan penelitian dengan melakukan pengolahan data dan analisis parameter fisis dari hasil inversi untuk identifikasi sistem panas bumi daerah tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian pada tugas akhir ini adalah bagaimana cara melakukan identifikasi sistem panas bumi lapangan “SK” dari hasil pemodelan yang optimal berdasarkan model 1D dan 2D dengan parameter nilai resistivitas dan didukung dengan data geologi regional.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan topik permasalahan dalam penelitian pada tugas akhir ini, penulis menyimpulkan beberapa batasan masalah yaitu:

1. Data yang digunakan adalah data magnetotelurik lapangan “SK” yang bersumber dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP).
2. Pemodelan yang akan di buat adalah pemodelan 1D dengan metode *Occam* dan 2D dengan metode *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)* berbasis perangkat lunak *WinGLink* yang di fasilitasi oleh pihak Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP).
3. Data penunjang yang digunakan adalah data geologi lapangan panas bumi “SK” yang bersumber dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP).
4. Target utama hasil penelitian pada tugas akhir ini adalah identifikasi sistem panas bumi wilayah pengukuran dari hasil pengolahan data magnetotelurik.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian pada tugas akhir ini adalah:

1. Mendapatkan hasil pemodelan data magnetotelurik lapangan panas bumi “SK” yang optimal berdasarkan nilai resistivitas dari hasil pemodelan 1D dan 2D.
2. Mengidentifikasi sistem panas bumi lapangan “SK” berdasarkan hasil pemodelan data magnetotelurik yang diintegrasikan dengan data geologi regional.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian pada tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai cara melakukan pemodelan 1D dan 2D data magnetotelurik.
2. Mengetahui cara melakukan pendekatan hasil pemodelan 1D dan 2D dengan mempertimbangkan kelebihan dan kekurangan dari hasil pemodelan yang dibuat.
3. Memberikan informasi mengenai identifikasi sistem panas bumi lapangan “SK” berdasarkan nilai resistivitas dari hasil pemodelan yang telah dibuat didukung dengan data geologi regional.
4. Hasil penelitian pada tugas akhir ini dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut dengan didukung oleh data geofisika lainnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

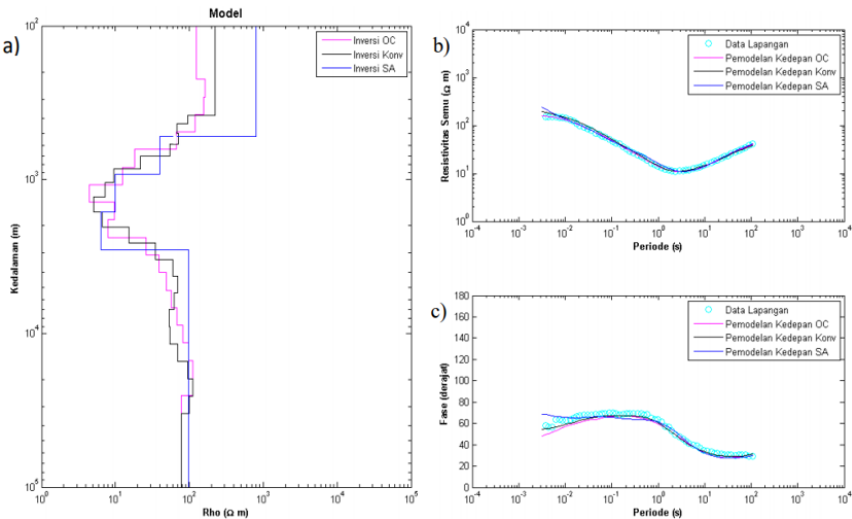
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

2.1.1 Pemodelan 1D Data Magnetotelurik

Pemodelan 1D menggunakan data magnetotelurik dapat dilakukan dengan metode *Occam* dengan parameter resistivitas semu dan periode. Pada studi literatur ini akan menampilkan hasil pemodelan 1D data magnetotelurik dengan metode *occam* dan *simulated annealing*.



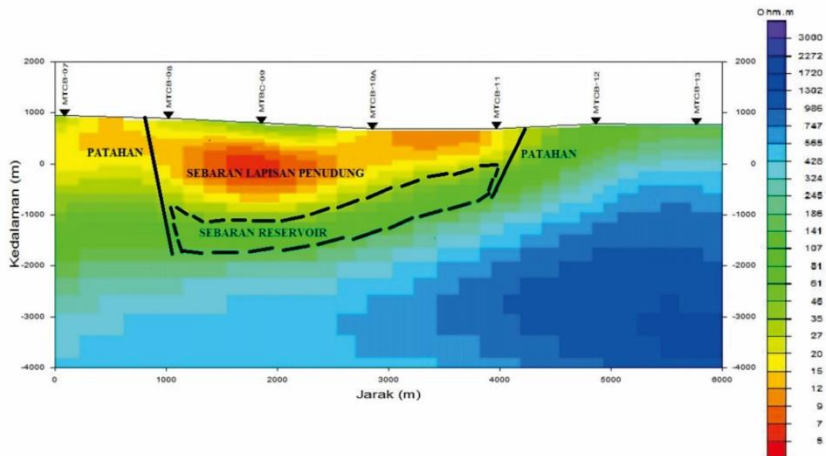
Gambar 2. 1 Pemodelan 1D dengan Metode *Occam* dan *Simulated Annealing* (Wijaya dkk., 2016).

Berdasarkan hasil pemodelan pada gambar 2.1, metode *Occam* menghasilkan model 1D yang lebih *smooth* terutama dalam memetakan lapisan tipis jika dibandingkan dengan hasil pemodelan *simulated annealing*. Pada studi literatur ini, pemodelan *Occam* 1D dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MatLab* dan *WinGLink* (konvensional). Berdasarkan hasil pemodelan dari kedua perangkat lunak tersebut, pemodelan dari perangkat lunak *WinGLink* menghasilkan model yang lebih representatif dibandingkan dengan hasil pemodelan menggunakan perangkat lunak *MatLab*. Hal tersebut dapat dilihat dari kurva *misfit* hasil pemodelan dengan data lapangan berupa resistivitas semu dan periode yang membandingkan kurva dari data lapangan, kurva pemodelan *simulated annealing*, kurva pemodelan *Occam* dengan *Matlab*, dan kurva pemodelan *Occam* dengan *WinGLink*. Metode *Occam* menunjukkan hasil

yang lebih baik berdasarkan *RMS error* dan kesesuaian model (Wijaya dkk., 2016).

2.1.2 Pemodelan 2D Data Magnetotelurik

Pada pemodelan 2D data magnetotelurik, parameter yang akan dianalisis dari hasil pengukuran adalah parameter resistivitas semu dan fase. Berdasarkan data pemetaan resistivitas bawah permukaan dari hasil pemodelan 2D tersebut, selanjutnya akan diketahui perkiraan mengenai susunan sistem panas bumi yaitu *reservoir* panas bumi, lokasi *cap rock* dan lokasi komponen sistem panas bumi lainnya di bawah permukaan. Metode magnetotelurik dapat digunakan di daerah yang memiliki manifestasi permukaan seperti mata air panas. Pada studi literatur ini, pemetaan sistem panas bumi dilakukan dengan pemodelan 2D metode NLCG menggunakan perangkat lunak *WinGLink*.



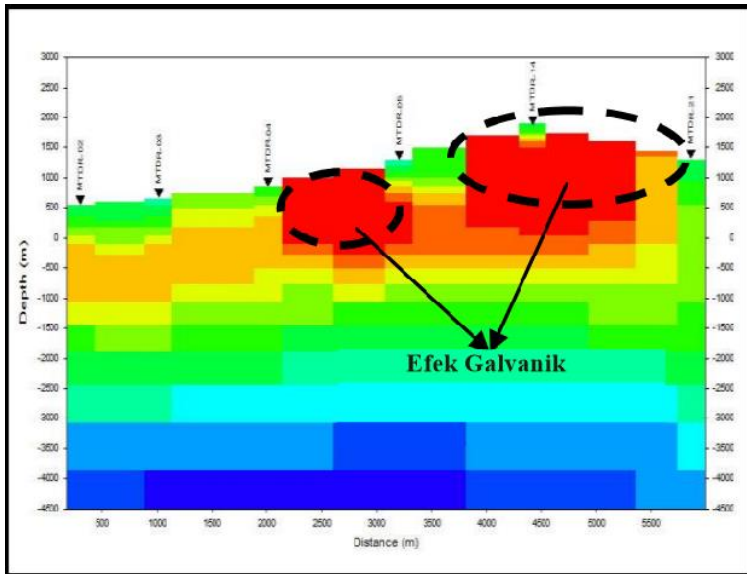
Gambar 2. 2 Hasil Pemodelan 2D dengan Metode NLCG (Syahwanti dkk., 2014).

Berdasarkan hasil pemodelan 2D pada gambar 2.2, dapat dilakukan pemetaan sistem panas bumi berdasarkan nilai resistivitas. Pemetaan komponen sistem panas bumi yang dapat diinterpretasi dengan jelas yaitu sebaran lapisan *cap rock*, *reservoir*, dan patahan sebagai *recharge area*. Dalam interpretasi sistem panas bumi, perlu adanya data geologi regional daerah pengukuran untuk memperkuat hasil interpretasi (Syahwanti dkk., 2014).

2.1.3 Pendekatan Hasil Pemodelan 1D dengan 2D untuk Mengurangi Efek Galvanik

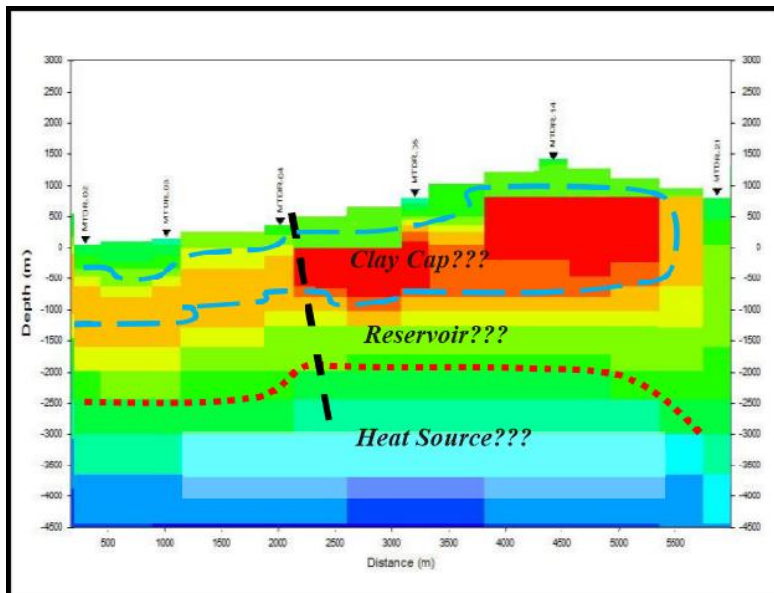
Hasil pemodelan 2D metode *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)* memiliki kelemahan untuk mengidentifikasi lapisan dangkal. Hal ini dipengaruhi karena data magnetotelurik tidak begitu stabil pada lapisan dangkal yang disebabkan oleh perbedaan topografi yang mencolok yang disebut juga karena efek galvanik. Akibatnya, hasil pemodelan 2D akan mengalami *shifting* pada lapisan dangkal. Pemodelan 2D NLCG tidak dapat menggambarkan topografi dengan baik karena hanya dapat membuat model dengan *grid* yang sama (Zakaria, 2013).

Pada studi kasus ini, hasil pemodelan 2D dilakukan pendekatan dengan hasil pemodelan 1D. Pendekatan yang dilakukan berupa koreksi statik model 2D pada lapisan dangkal yang mengalami *shifting* seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Efek Galvanik Pada Pemodelan 2D (Wibowo, 2013).

Untuk mengatasi data yang mengalami *shift* tersebut dilakukanlah koreksi statik dengan menggunakan pendekatan inversi 1D.

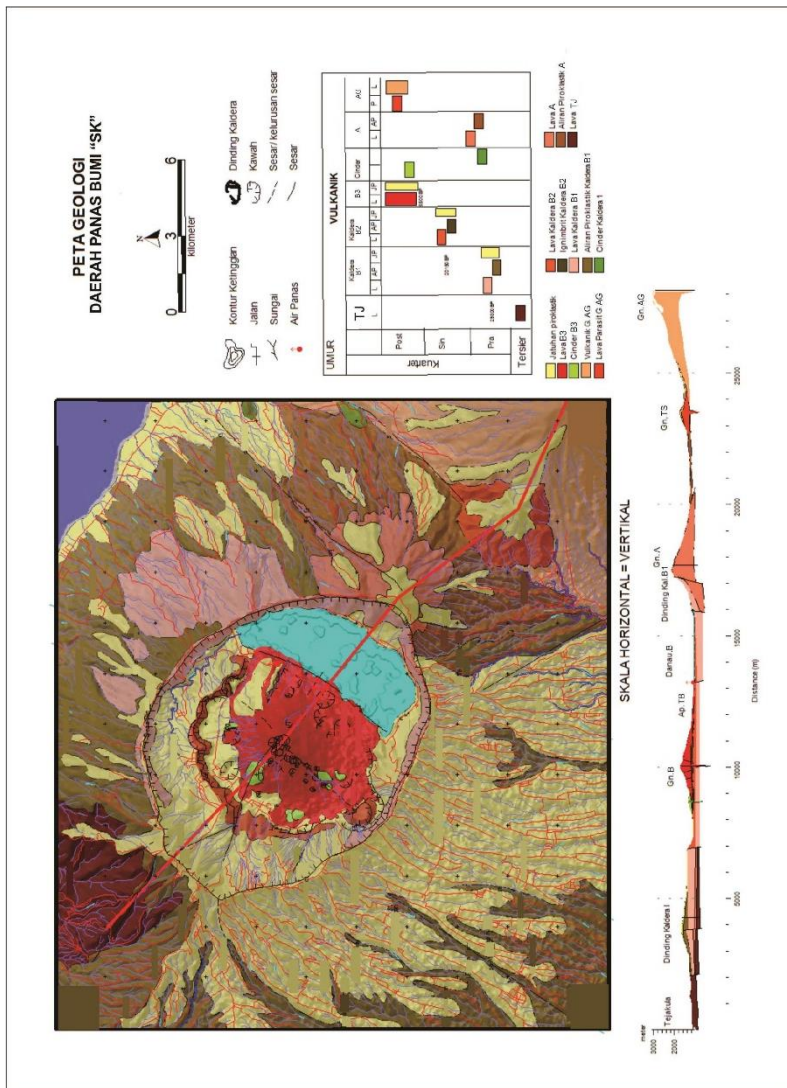


Gambar 2. 4 Hasil Pendekatan Model 1D dan 2D (Wibowo, 2013).

Pendekatan dengan model 2D tersebut dilihat berdasarkan nilai resistivitas pada hasil pemodelan 1D dan 2D (Wibowo, 2013). Koreksi statik pada pemodelan 1D tidak dipengaruhi oleh model awal yang tersusun dari *grid* kotak seperti pada pemodelan 2D, sehingga koreksi statik pada pemodelan 1D lebih optimal daripada koreksi statik pada pemodelan 2D.

2.2.1 Geologi Regional Lapangan Panas Bumi “SK”

Kondisi geologi lapangan panas bumi “SK” ditunjukkan lewat peta berikut.



Gambar 2. 5 Peta Geologi Lapangan Panas Bumi "SK" (PSDMPB, 2012).

Berdasarkan hasil pemetaan lapangan tim Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) dan pengamatan melalui citra *landsat*, daerah panas

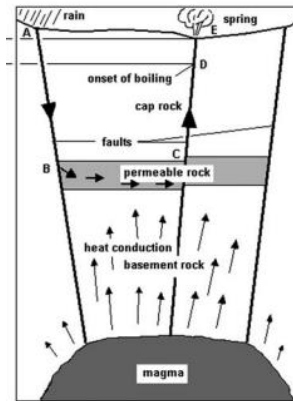
bumi “SK” dibagi menjadi beberapa unit satuan geologi, dari tua ke muda terdiri dari lava “TJ”, lava “Gunung A”, aliran piroklastik “Gunung A”, *Cinder Cone* Kaldera “B1”, aliran piroklastik Kaldera “B1”, lava Kaldera B1, aliran piroklastik Kaldera “B2”, lava Kaldera “B2”, Lava “Gunung AG”, lava parasit “Gunung AG”, *Cinder Cone* “B3”, lava “B3”, dan jatuhnya piroklastik “B”.

Struktur geologi yang berkembang pada lapangan panas bumi “SK” menunjukkan tegasan utama Utara-Selatan yang kemudian terbagi lagi menjadi orde tegasan berupa arah Barat Laut-Tenggara sesuai dengan kelurusan antara “Gunung B”-“Gunung A”-“Gunung AG” dan arah Barat Daya –Timur Laut sejajar dengan pola aktivitas kawah “Gunung B” dari kawah 1 sampai kawah 3. Pola tegasan sesar utama yang berkembang di daerah kaldera “B” berupa sesar “B” yang berarah Barat Laut-Tenggara. Pola ini mengontrol terbentuknya magmatisme dan pembentukan “Gunung B”-“Gunung A”-“Gunung AG”. Pola lainnya adalah pola Utara-Selatan yang mengontrol manifestasi di sepanjang pinggir danau “B” dan pembentukan fumarol pada kawah “B1”-“B3”. Kenampakan berupa kawah parallel dan terbentuknya dinding depresi danau bagian barat. Pola sesar Timur Laut-Barat Daya seperti yang terlihat pada celah sekitar “Gunung A” dan sesar di sekitar “TJ” yang memisahkan batuan tersier dan kuarter (PSDMBP, 2012).

Berdasarkan hasil tim survey PSDMBP, daerah penelitian berada pada busur vulkanik dengan lingkungan gunung api aktif, dimana tersimpan potensi energi panas bumi berdasarkan kehadiran manifestasi yang dicirikan oleh munculnya fumarol, *steam ground*, air panas dan alterasi batuan. Daerah tersebut berada pada satuan formasi Lava ‘B3’. Satuan ini tersingkap di bagian dalam Kaldera “B2”, dan merupakan produk Gunung “B” yang diperkirakan menutup Kaldera “B3” hingga ke arah Danau “B”. Satuan ini membentuk morfologi tinggian berupa gunung dengan kerucut yang telah terpancung menjadi beberapa bagian. Setidaknya terdapat tiga kawah besar yang membentuk satuan ini, dan merupakan hasil erupsi Gunung “B”. Dari analisis citra dan penarikan topografi terdapat lebih dari 10 bekas kawah yang dapat dikenali. Pada beberapa tempat masih terlihat sisa dari *volcanic neck* berupa lava basal berbentuk tiang (PSDMBP, 2012).

2.2.2 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi dapat digambarkan sebagai konveksi fluida pada kerak bumi teratas di mana dalam ruang terperangkap, transfer panas dari sumber panas (*heat source*) ke penyimpan panas dalam keadaan permukaan yang bebas (*free surface*). Sistem panas bumi sendiri umumnya dibangun atas lima elemen utama yaitu *heat source*, *reservoir*, *cap rock*, struktur geologi yang biasanya merupakan patahan dan terakhir adalah fluida (Dipipo, 2005).



Gambar 2. 6 Sistem Panas Bumi (Dipipo, 2005).

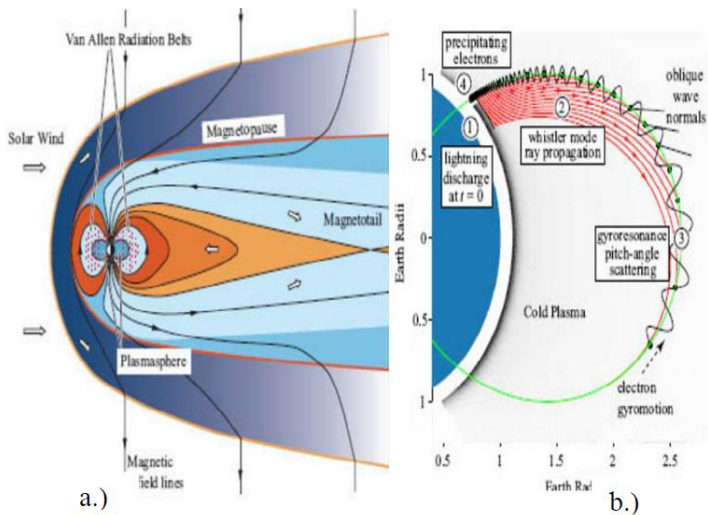
Sistem panas bumi memiliki lima elemen penting. Magma berperan sebagai *heat source* dari sistem panas bumi. Kemudian ada *permeable rock* yang berperan sebagai *reservoir*. Pada *basement rock* akan mengalami *heat conduction* dari magma menuju *reservoir*. Hujan berperan sebagai fluida yang mengalir melalui patahan A menuju *reservoir*. Huruf A pada gambar merupakan patahan yang berfungsi sebagai *recharge area* yaitu wilayah yang berperan dalam mengalirkan fluida ke *reservoir*. Sistem panas bumi akan terperangkap pada *reservoir* dikarenakan adanya lapisan penudung atau *cap rock*. Manifestasi akan dapat dilihat pada permukaan bumi berupa *spring* yang digambarkan pada huruf B yang kemudian diteruskan alirannya pada huruf C dan pada akhirnya muncul *spring* pada permukaan melwati patahan D yang vertikal ke arah permukaan (Dipipo, 2005).

2.2.3 Metode Magnetotelurik

Metode magnetotelurik merupakan metode elektromagnetik pasif yang melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan bumi dari kedalaman beberapa meter hingga ratusan kilometer. Metode magnetotelurik menggunakan frekuensi dengan kisaran 10^{-5}Hz - 10^3 Hz (Simpson dan Bahr, 2005).

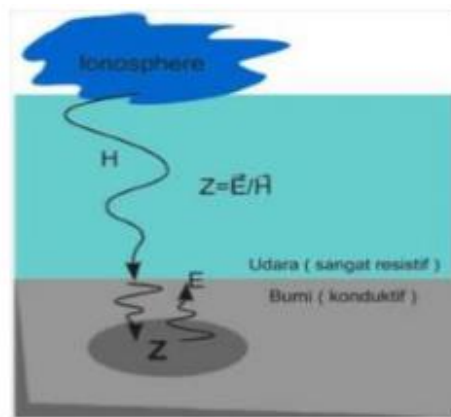
Pada frekuensi yang cukup rendah (kurang dari 1 Hz), solar wind yang mengandung partikel-partikel bermuatan listrik berinteraksi dengan medan magnet permanen bumi sehingga menyebabkan variasi medan elektromagnetik. Variasi pada jangkah frekuensi audio (*audio frequency band*, di atas 1 Hz) terutama disebabkan oleh aktivitas meteorologis berupa petir. Petir yang terjadi di suatu tempat menimbulkan gelombang elektromagnetik yang terperangkap

antara ionosfer dan bumi (*wave guide*) dan menjalar mengitari bumi (Grandis, 2013). Penjelasan tersebut akan diterangkan pada gambar dibawah ini;



Gambar 2. 7 Dua Jenis Sumber Gelombang Magnetotelurik. a) Solar Wind, b) *Lightning Discharge* (Kauffman dan Keller, 1981).

Konsep gelombang elektromagnetik yang mendasari metode magnetotelurik dapat diwakili oleh Gambar 2.8. Medan elektromagnetik alami (medan elektromagnetik primer) sebagai sumber metode magnetotelurik sampai ke bumi dengan memiliki variasi terhadap waktu.



Gambar 2. 8 Prinsip Dasar Metode Magnetotelurik (Vozoff, 1986).

Medan elektromagnetik tersebut menginduksi *Ore body* di bawah permukaan Bumi sehingga menimbulkan *eddy current* (arus telurik) yang menggenerate medan elektromagnetik sekunder. Lalu *receiver* yang berada di permukaan menangkap total medan elektromagnetik sebagai penjumlahan dari medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder (Daud, 2010).

2.2.4 Persamaan Maxwell

Sifat-sifat perambatan gelombang elektromagnetik didasarkan pada persamaan Maxwell sebagai berikut;

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Hukum Faraday}) \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Hukum Ampere}) \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q \quad (\text{Hukum Gauss}) \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Hukum Gauss dalam Magnetisasi}) \quad (2.4)$$

Dimana,

\vec{E} : medan listrik (Volt/m)

\vec{B} : fluks atau induksi magnetik (Weber/m² atau Tesla)

\vec{H} : medan magnet (Ampere/m)

\vec{j} : rapat arus (Ampere/m²)

\vec{D} : pergeseran listrik (Columb/m²)

q : rapat muatan listrik (Columb/m³)

Pengolahan data magnetotelurik memiliki beberapa asumsi selama pengolahan datanya yaitu:

1. Mematuhi persamaan umum elektromagnetik Maxwell.
2. Bumi tidak menghasilkan energi elektromagnetik, tetapi hanya menghilangkan atau menyerapnya.
3. Seluruh medan elektromagnetik bersifat konservatif (hanya bergantung pada posisi) dan secara analitik jauh dari sumber.
4. Sumber elektromagnetik alami yang dimanfaatkan dibangkitkan oleh sistem arus ionosfer dengan skala besar dan jauh dari permukaan bumi, sehingga gelombang yang tiba dipermukaan bumi dianggap sebagai gelombang planar.
5. Tidak ada akumulasi muatan bebas yang terjadi dalam bumi kecuali untuk bumi berlapis.
6. Muatan bersifat kekal dan bumi bertindak sebagai bidang konduktor.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

Dimana,

\vec{j} = densitas listrik (Ampere/m²)

σ = konduktivitas medium (S/m)

\vec{E} = kuat medan listrik (V/m)

7. Pergeseran medan listrik adalah kuasi-statik. Oleh karena itu, variasi waktu pergeseran arus dapat diabaikan dibandingkan dengan konduktivitas arus, hal ini menunjukkan bahwa induksi elektromagnetik yang terjadi didalam bumi merupakan proses difusif.
8. Variasi permitivitas listrik dan permeabilitas batuan diasumsikan dapat diabaikan dibandingkan variasi konduktivitas batuan (Simpson dan Bahr, 2005).

Persamaan Maxwell di atas dilakukan operasi matematis pada persamaan 2.1 terhadap 2.2 untuk mendapatkan persamaan gelombang elektromagnetik dengan medan listrik. Diawali dengan persamaan fluks magnetik, dimana;

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

Disubstitusikan ke persamaan 2.1 menjadi;

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \vec{H} \quad (2.7)$$

Kemudian, persamaan pergeseran medan dan densitas listrik (persamaan 2.5) listrik disubstitusikan ke persamaan 2.2, dimana;

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.8)$$

Setelah disubstitusikan menjadi;

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (2.9)$$

Setelah itu, dilakukan operasi matematis *curl* untuk mendapatkan persamaan gelombang elektromagnetik dengan medan listrik, dimana;

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \times \left(-\mu \frac{\partial}{\partial t} \vec{H}\right) \quad (2.10)$$

Berasumsi dengan sifat operasi matematis *curl* $\nabla \times \alpha F = \alpha(\nabla \times F)$, maka persamaan 2.10 dapat dituliskan menjadi;

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) \quad (2.11)$$

Persamaan 2.11 dilakukan operasi rotasi dengan faktor identitas, dimana;

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.12)$$

Karena nilai $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ persamaan 2.11 dapat ditulis menjadi;

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) = -\nabla^2 \vec{E} \quad (2.13)$$

Kemudian, substitusi nilai $(\nabla \times \vec{H})$ dengan persamaan 2.9. sehingga dapat ditulis menjadi;

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.14)$$

Operasi yang sama dilakukan pada persamaan 2.2 terhadap 2.1 untuk mendapatkan persamaan gelombang elektromagnetik dengan medan magnet;

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (2.15)$$

Persamaan tersebut menunjukkan sifat penjalaran gelombang dari medan elektromagnetik. Medan elektromagnetik menjalar sebagai gelombang pada udara dan merambat ke dalam bumi secara tegak lurus dan menyebar secara difusi.

Berdasarkan asumsi ketiga, medan elektromagnetik (variabel \vec{E} dan \vec{H}) bersifat konservatif yang hanya bergantung pada posisi dengan waktu penjalaran harmonik. Oleh karena itu, variasi terhadap waktu dapat direpresentasikan oleh fungsi periodik sinusoidal dengan solusi persamaan gelombang sebagai berikut;

$$E_{(z,t)} = E_0 \cdot \cos(kz - \omega t) \quad (2.16)$$

$$H_{(z,t)} = H_0 \cdot \cos(kz - \omega t) \quad (2.17)$$

Dua persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk kompleks menjadi;

$$E_{(z,t)} = E_0 \cdot e^{-i(kz - \omega t)} \quad (2.18)$$

$$H_{(z,t)} = H_0 \cdot e^{-i(kz - \omega t)} \quad (2.19)$$

Kemudian persamaan 2.18 dirutunkan dua kali menjadi;

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t} = i\omega(i\omega) \cdot E_0 \cdot e^{i\omega t} = -\omega^2 \vec{E} \quad (2.20)$$

Operasi yang sama juga dilakukan pada persamaan 2.19, sehingga persamaan 2.14 dan 2.15 dapat dituliskan menjadi;

$$\nabla^2 \vec{E} = (i\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) \vec{E} \quad (2.21)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = (i\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) \vec{H} \quad (2.22)$$

Dalam studi gelombang elektromagnetik pada metode magnetotelurik, penjalaran gelombang elektromagnetik terjadi secara vertikal ke dalam bumi. Perpindahan arus (*displacement current*) dapat diabaikan, Oleh karena itu, suku yang mengandung ε (permitivitas listrik) dapat diabaikan terhadap suku yang mengandung σ (konduksi listrik) karena harga konduktivitas listrik lebih besar dibandingkan dengan dengan harga permeabilitas dan harga permitivitasnya ($\sigma \gg \omega \varepsilon$), sehingga persamaan diatas menjadi;

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu\sigma \vec{E} \quad (2.23)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = i\omega\mu\sigma \vec{E} \quad (2.24)$$

Berdasarkan persamaan Helmholtz, dapat ditentukan nilai bilangan gelombang atau nilai k yaitu;

$$\nabla^2 \vec{E} - k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.25)$$

Dengan mensubstitusi dan melakukan perhitungan persamaan 2.23 dengan persamaan 2.25, nilai k diperoleh menjadi;

$$k = \sqrt{i\omega\mu\sigma} \quad (2.26)$$

Nilai k merupakan suatu bilangan kompleks yang menyatakan kondisi dari suatu medium. Nilai k bilangan gelombang yang dapat dinyatakan dalam bentuk (Jiraceek, 2007);

$$k = \pm (\alpha + i\beta) \quad (2.27)$$

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}} \quad (2.28)$$

$$k = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}} (Real) \quad (2.29)$$

$$k = -i \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}} (Imajiner) \quad (2.30)$$

2.2.5 Tahanan Jenis Semu

Tahanan jenis tidak konstan terhadap kedalaman, maka dapat dianggap sebagai tahanan jenis rata-rata pada setiap kedalaman tahanan jenis semu ρa , untuk lapisan bumi dapat diperoleh dari persamaan impedansi sebagai berikut;

$$\frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = \frac{\mu\omega}{k} = Z \quad (2.31)$$

$$z = \frac{\mu\omega}{\sqrt{\mu\omega i\sigma}} = \sqrt{\frac{\mu^2\omega^2\rho}{\mu\omega i}} \quad (2.32)$$

$$\rho_a = -\frac{i}{\mu\omega} |z^2| \quad (2.33)$$

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega} |z^2| \quad (2.34)$$

Bumi merupakan medium homogen isotropik yang hanya terdapat satu komponen medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus (ortogonal), $\vec{E} = (Ex, 0, 0)$ dan $\vec{H} = (0, Hy, 0)$ yang masing-masing hanya bervariasi terhadap kedalaman (z) (Simpson dan Bahr, 2005).

2.2.6 Skin Depth

Skin depth didefinisikan sebagai kedalaman pada suatu medium homogen dengan resistivitas ρ dimana amplitudo gelombang elektromagnetik telah tereduksi menjadi $1/e$ dari amplitudonya di permukaan bumi ($\ln e = 1$ dimana $e = 2.718 \dots$). karena $e^{-1} = \delta$, maka;

$$\delta = \frac{1}{\text{Real}(k)} = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \quad (2.35)$$

Untuk;

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Maka;

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.36)$$

Dengan δ merupakan *skin depth* dalam satuan meter, f merupakan periode dalam detik, dan ρ_a merupakan resistivitas semu dalam ohm meter (Ωm) (Simpson dan Bahr, 2005).

2.2.7 Impedansi

Impedansi merupakan perbandingan antara medan listrik (E) dan medan magnetik (H). Pada metode magnetotelurik, salah satu variabel yang dicari yaitu tensor impedansi $Z(\omega)$. Secara umum, hubungan linier antara medan listrik, medan magnetik, dan impedansi dapat dirumuskan dengan persamaan berikut;

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.37)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.38)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Untuk perbedaan 1D, 2D dan 3D;

$$1D : Z_{xy} = -Z_{yx} \mid Z_{xx} = Z_{yy} = 0,$$

$$2D : Z_{xy} \neq -Z_{yx} \mid Z_{xx} = Z_{yy} = 0,$$

$$3D : Z_{xx} \neq Z_{yy} \text{ dan } Z_{xy} \neq -Z_{yx}$$

Dimana $[Z]$ merepresentasikan tensor impedansi.

$Hx(\omega)$, $Hy(\omega)$, $Ex(\omega)$, dan $Ey(\omega)$ adalah transformasi Fourier dari perubahan medan magnetik (H) dan medan listrik (E). Apabila diasumsikan Bumi 1-D maka nilai impedansi dapat ditunjukkan pada persamaan (Jupp dan Vozoff, 1977);

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} = (1 + i) \left(\frac{\omega\mu}{2\sigma} \right)^{1/2} \quad (2.40)$$

dimana,

$$E_x : \text{medan listrik pada arah } x \left(\frac{V}{m} \right)$$

$$H_y : \text{medan magnet pada arah } y \left(\frac{A}{m} \right)$$

ω : frekuensi angular

$$\mu : \text{permeabilitas magnetik} \left(\frac{H}{m} \right)$$

k : bilangan gelombang

Apabila kita asumsikan Bumi seragam maka nilai resistivitas semu harus sama pada setiap frekuensi dan medan listrik akan berada di atas medan magnetik pada fase 45 derajat untuk semua frekuensi. Kemudian nilai resistivitas semu dan fase tersebut diplot pada grafik resistivitas semu terhadap frekuensi dan fase terhadap frekuensi. Dua modulus independen dari impedansi dianalisis untuk analisis pendekatan Bumi 2-D dalam sistem koordinat Kartesian dengan y searah dengan arah *strike* dan x tegak lurus terhadap arah *strike*. Modus *Transverse Electric* (TE) adalah modulus yang medan listriknya searah dengan *strike*, sedangkan modulus *Transverse Magnetik* (TM) adalah modulus yang medan magnetiknya searah dengan *strike*. Bagian diagonal dari impedansi tensor untuk pendekatan Bumi 2D adalah nol (Simpson dan Bahr, 2005).

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

dimana,

$$Z_{yx} = Z_{TE} = \frac{E_y}{H_x} \quad (2.42)$$

$$Z_{xy} = Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.43)$$

Asumsikan data yang diperoleh dengan menggunakan sistem koordinat (x'', y'') dan sistem koordinat struktural (x, y) dimana y searah dengan *strike*, data MT dirotasi dari (x'', y'') ke (x, y). Jika sudut rotasi dari (x'', y'') ke (x, y) adalah θ maka kita dapat menerapkan matriks rotasi (Simpson dan Bahr, 2005):

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

sehingga,

$$E = RE' \text{ dan } H = RH' \quad (2.45)$$

Sudut rotasi (θ) di atas dapat ditentukan dengan melakukan rotasi tensor impedansi secara meningkat atau dapat dihitung secara analitik berdasarkan persamaan berikut :

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left(\frac{2R_1 R_2 + I_1 I_2}{R_1^2 + I_1^2 - R_2^2 - I_2^2} \right) \quad (2.46)$$

dimana,

$$\begin{cases} R_1 = R_e (Z_{xx} - Z_{yy}) \\ I_1 = I_m (Z_{xx} - Z_{yy}) \\ R_2 = R_e (Z_{xy} - Z_{yx}) \\ I_2 = I_m (Z_{xy} - Z_{yx}) \end{cases} \quad (2.47)$$

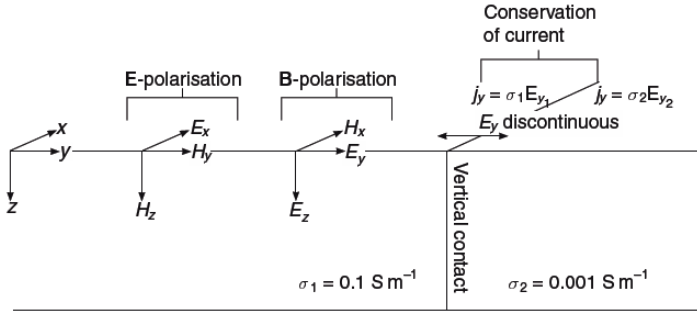
Tensor impedansi, Z merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bagian riil dan imajiner. Oleh karena itu, masing – masing komponen, Z_{ij} dan Z tidak hanya memiliki besar, tetapi juga memiliki fase sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut (Simpson dan Bahr, 2005) :

$$\rho_{a,ij}(\omega) = \frac{1}{\pi_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \quad (2.48)$$

$$\Phi_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im} \{Z_{ij}\}}{\text{Re} \{Z_{ij}\}} \right) \quad (2.49)$$

2.2.8 Transverse Electric dan Transverse Magnetic

Dalam impedansi yang telah direduksi terdapat impedansi modus *Transverse Electric* (TE) atau polarisasi E dan mode *Transverse Magnetic* (TM) atau polarisasi B . Perambatannya dalam medium dua dimensi digambarkan dengan,



Gambar 2. 9 Model 2 Dimensi dengan Polarisasi E dan B dengan Arah Strike x (Simpson dan Bahr, 2005).

Modus TE pada gambar dapat dijelaskan bahwa modus ini mempunyai perambatan arus yang sejajar dengan arah *strike* x . Pada modus ini terdapat tiga komponen elektromagnetik E_x, B_y, B_z dituliskan dalam persamaan sebagai berikut;

$$\partial_y E_x = i\omega B_z \quad (2.50)$$

$$\partial_z E_x = -i\omega B_y \quad (2.51)$$

$$\partial_y B_z = \sigma \mu E_x \quad (2.52)$$

Pada polarisasi E akan lebih baik penggambarannya pada arah vertikal dibanding dengan modus polarisasi B . Hal ini dikarenakan modus polarisasi E memiliki komponen B_z .

Modus TM atau polarisasi B mempunyai aliran arus yang tegak lurus dengan arah *strike* x . Pada modus ini terdapat tiga komponen elektromagnetik yakni E_z, E_y, B_x yang dijabarkan sbagai berikut;

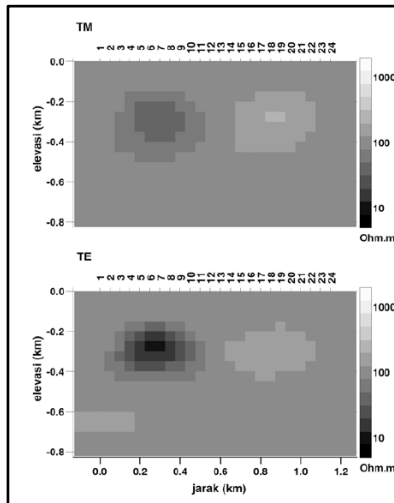
$$\partial_y B_x = \sigma \mu_0 E_z \quad (2.53)$$

$$-\partial_z B_x = \sigma \mu_0 E_y \quad (2.54)$$

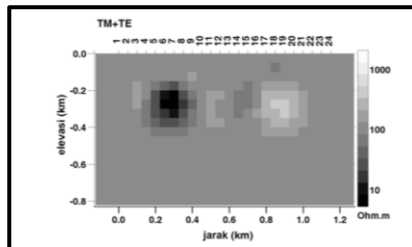
$$\partial_y E_z - \partial_z E_y = i\omega B_x \quad (2.55)$$

Modus TM mempunyai karakteristik penggambaran lateral yang lebih baik daripada modus TE. Hal ini dikarenakan modus ini memiliki komponen B_x .

Pada polarisasi TE, terlebih dahulu dilakukan perhitungan medan listrik E_x pada *grid* dan hasilnya kemudian digunakan untuk memperkirakan H_y melalui pendekatan diferensiasi secara numerik Hal yang sama dilakukan untuk polarisasi TM. Data TE dan TM saling melengkapi, sehingga model inversi relatif lebih jelas (Grandis, 2009). Hal terebut akan diperlihatkan pada gambar berikut;



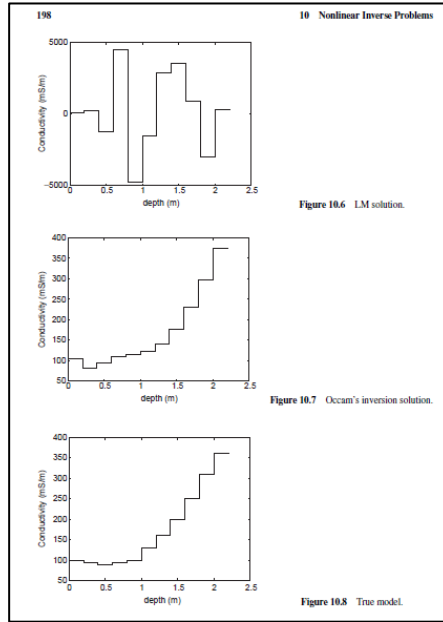
Gambar 2. 10 Hasil Pemodelan Inversi 2D Data Sintetik Magnetotelurik Komponen TM (atas) dan TE (bawah) (Grandis, 2009).



Gambar 2. 11 Hasil Pemodelan Inversi 2D Data Sintetik Magnetotelurik yang Merupakan Gabungan Antara Komponen TM dan TE (Grandis, 2009).

2.2.9 Inversi *Occam* 1D

Perubahan kecil pada data pengamatan menyebabkan perubahan besar pada parameter hasil inversi serta memperpanjang proses iterasi. Oleh karena itu, parameter hasil inversi sangat bergantung pada harga parameter estimasi awal. Inversi *Occam* merupakan suatu bentuk metode inversi yang memanfaatkan tingkat kekasaran model sehingga hasilnya tidak bergantung pada estimasi awal (Aster dkk., 2005). Inversi *Occam* akan menghasilkan pemodelan yang lebih *smooth* yang secara sederhana diperlihatkan pada gambar dibawah ini;



Gambar 2. 12 Perbandingan Hasil Pemodelan 1D Metode *Non-Linear*, *LM Solution* dan *Occam* (Aster dkk., 2005).

Fungsi dari inversi *Occam* adalah;

$$R_1 = \sum_{i=2}^N (m_i - m_{i-1})^2 \quad (2.56)$$

$$R_2 = \sum_{i=2}^N (m_{i+1} - 2m_i - m_{i-1})^2 \quad (2.57)$$

Dimana R_1 merupakan fungsi *roughness* orde 1 dan R_2 merupakan fungsi *roughness* orde 2, serta $m(z)$ merupakan nilai resistivitas. Dengan menggunakan orde yang semakin tinggi orde pada fungsi tersebut, nilai *error* yang dihasilkan akan semakin kecil.

Fungsi pemodelan ke depan $F_j[m]$ mampu memprediksi nilai dari pengukuran model diskrit dengan menggunakan metode *least-square*;

$$X^2 = \sum_{j=1}^M (d_j - F_j[m])^2 / \sigma_j^2 \quad (2.58)$$

Dimana σ_j^2 merupakan nilai ketidakpastian atau *statistic error*. Dengan menggunakan suatu model m_j yang sesuai dengan data lapangan, sehingga menghasilkan R_1 dan R_2 dengan nilai X^2 yang paling kecil, maka diperoleh yang sesuai.

Bentuk solusi umum dari pemodelan kedepan $F_j[m]$ (*non-linear*) untuk setiap datum ke- j adalah;

$$d_j = F_j[m], \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2.59)$$

Dalam bentuk notasi vektor yaitu;

$$d = F[m] \quad (2.60)$$

Sedangkan pada kondisi linear;

$$d = \tilde{G}m \quad (2.61)$$

Dimana \tilde{G} merupakan matriks $M \times N$ dengan elemen matriks yang dihitung melalui teori pemodelan kedepan. Dalam kasus linear, persamaan misfit X^2 dapat dituliskan menjadi;

$$X^2 = \|\tilde{W}d - \tilde{W}\tilde{G}m\|^2 \quad (2.62)$$

Dengan persamaan fungsi *roughness* menjadi;

$$R_1 = \|\tilde{\partial}m\|^2 \quad (2.63)$$

$$R_2 = \|\tilde{\partial}^2m\|^2 \quad (2.564)$$

Dimana $\tilde{\partial}$ adalah matriks $M \times N$. Maka bentuk umum persamaan pemodelan dalam kasus linear dituliskan sebagai berikut;

$$U = \|\tilde{\partial}m\|^2 + \mu^{-1} \left\{ \|\tilde{W}d - \tilde{W}\tilde{G}m\|^2 - X_*^2 \right\} \quad (2.64)$$

Sedangkan dalam kasus non-linear dituliskan sebagai berikut;

$$U = \|\tilde{\partial}m\|^2 + \mu^{-1} \left\{ \|\tilde{W}(d - F[m_1] + \tilde{J}_1 m_1 - \tilde{W}\tilde{J}_2 m_2)\|^2 - X_*^2 \right\} \quad (2.65)$$

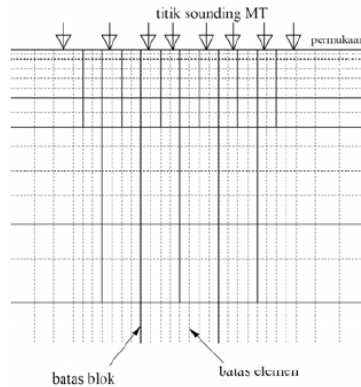
Dimana \tilde{W} = diagonal $(1/\sigma_1, \dots, 1/\sigma_n)$ matriks $M \times N$, μ^{-1} merupakan faktor pengali Lagrange, $\|\tilde{W}d - \tilde{W}\tilde{G}m\|^2$ adalah misfit, serta X_*^2 adalah error.

Pada pemodelan *Occam* 1D dibutuhkan parameter model sebagai model awal berupa nilai resistivitas, kedalaman atau jumlah lapisan yang dihitung secara komputasi oleh perangkat lunak *WinGLink*. Solusi untuk model 1D algoritma inversi *Occam* adalah (Constable dan Parker, 1987);

$$m_{n+1} = [\mu\partial^T\partial + (WJ_n)^T WJ_n]^{-1} (WJ_n)^T Wd_n \quad (2.66)$$

2.2.10 Inversi 2D *Non Linear Conjugate Gradient* (NLCG)

Pada model 2D, terdapat variasi nilai resistivitas pada arah lateral dan vertikal yang terdiri dari blok-blok tertentu. Medium yang ada didiskritasi menjadi blok dengan geometri tetap sehingga parameter model adalah nilai resistivitas untuk tiap blok. Ukuran blok tidak dibuat seragam untuk menggambarkan resolusi data Magnetotelurik yang berkurang terhadap jarak dan kedalaman dari titik pengamatan, serta untuk penerapan syarat batas pada penyelesaian persamaan diferensial medan elektromagnetik (mode TE dan mode TE) secara numerik menggunakan *finite difference* (Grandis, 2009).



Gambar 2. 13 Model 2D Dimensi yang didiskritkan dengan *Finite Difference* (Grandis, 2009).

Pendekatan dengan turunan *finite difference* didapatkan dengan memperkirakan dari perbedaan antara *neighboring points* pada suatu *grid* kotak. Kekurangan pada *finite difference* adalah tidak dapat menggambarkan topografi dengan baik karena hanya dapat membuat model dengan *grid* yang sama (Zakaria, 2013).

Pemecahan masalah pemodelan inversi 2D menggunakan algoritma NLCG dilakukan sebagai mencari solusi model yang meminimumkan fungsi objektif ψ . Secara umum, fungsi yang menghubungkan data dengan parameter model adalah fungsi *non-linear*, oleh karena itu, pemodelan inversi data magnetotelurik menggunakan model 2D dengan persamaan dan algoritma penyelesaian inversi NLCG 2D (Grandis, 2009). Bentuk umum masalah inversi *non-linear* dituliskan dalam persamaan;

$$d = F(m) + e \quad (2.67)$$

Dimana $d = [d^1, d^2, \dots, d^n]^T$ adalah tiap vektor data dengan tiap d yang merupakan salah satu logaritma amplitudo atau fase dari resistivitas semu untuk

keterangan mode *Transverse Electric* atau *Transverse Magnetic*, $m = [m^1, m^2, \dots, m^n]^T$ adalah vektor model dari parameter yang didefinisikan sebagai fungsi resistivitas ($m(x) = \log \rho(x)$), e adalah faktor *error* dan F adalah fungsi pemodelan kedepan (Grandis, 2009).

Pemecahan permasalahan inversi dalam pengertian *Tikhonov Regularization* untuk mencari model yang meminimumkan fungsi objektif ψ dan didefinisikan sebagai;

$$\psi(m) = (d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \lambda \|L(m - m_0)\|^2 \quad (2.68)$$

Dimana λ merupakan parameter regularisasi sebuah bilangan positif, V adalah matriks kovarian *error*, dan L adalah operator linear (*smoothness*) atau operator Laplacian Δ yang dituliskan sebagai berikut (Aster dkk., 2005);

$$\|L(m - m_0)\|^2 = \int (\Delta(m - m_0))^2 dx \quad (2.69)$$

Dalam perangkat lunak *WinGLink* yang digunakan, parameter regularisasi merupakan input data yang menggunakan simbol *tau* (τ) yang didefinisikan menjadi sebagai berikut;

$$\Phi = \Phi_d + \tau \cdot \Phi_m \quad (2.70)$$

Dimana Φ adalah fungsi objektif yang digunakan, Φ_d adalah fungsi objektif dari data, τ adalah parameter regularisasi, dan Φ_m adalah fungsi objektif dari model.

Metode NLCG memberikan langsung pemecahan untuk meminimumkan fungsi objektif, dengan model *sequence* yang dituliskan sebagai berikut (Rodi dan Mackie, 2001);

$$\psi(m_j + a_j h_j) = \min_a \psi(m_j + a_j h_j) \quad (2.71)$$

Dimana :

$$m_{j+1} = m_j + a_j h_j, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

$$h_j = -C_j g_j + \beta_j h_{j-1}, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

a_j adalah urutan langkah-langkah, h_j adalah arah pencarian, C_j adalah suatu *preconditioner*, g_j adalah gradient dari fungsi objektif dan β_j adalah suatu nilai skalar yang dihitung dengan;

$$\beta_j = \frac{g_j^T C_j (g_j - g_{j-1})}{g_j^T C_{j-1} g_{j-1}} \quad (2.72)$$

2.2.11 Resistivitas Batuan

Batuan tersusun dari berbagai mineral dan mempunyai sifat kelistrikan. Beberapa batuan tersusun dari satu jenis mineral saja, sebagian kecil lagi dibentuk oleh gabungan mineral, dan bahan organik serta bahan-bahan vulkanik. Sifat kelistrikan batuan adalah karakteristik dari batuan dalam menghantarkan arus listrik. Batuan dapat dianggap sebagai medium listrik seperti pada kawat penghantar listrik, sehingga mempunyai tahanan jenis (resistivitas).

Resistivitas batuan adalah hambatan dari batuan terhadap aliran listrik. Resistivitas batuan dipengaruhi oleh porositas, kadar air, dan mineral. Menurut Telford (1990) aliran arus listrik di dalam batuan dan mineral dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi secara elektronik, konduksi secara elektrolitik, dan konduksi secara dielektrik. Konduksi ini terjadi jika batuan atau mineral mempunyai banyak elektron bebas sehingga arus listrik dialirkan dalam batuan atau mineral oleh elektron-elektron bebas tersebut.

Sebagian besar batuan merupakan penghantar yang buruk dan memiliki resistivitas yang sangat tinggi. Batuan biasanya bersifat porus dan memiliki pori-pori yang terisi oleh fluida, terutama air. Batuan-batuan tersebut menjadi penghantar elektrolitik, di mana konduksi arus listrik dibawa oleh ion-ion elektrolitik dalam air. Konduktivitas dan resistivitas batuan porus bergantung pada volume dan susunan pori-porinya. Konduktivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan bertambah banyak, dan sebaliknya resistivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan berkurang.

Konduksi pada batuan atau mineral bersifat dielektrik terhadap aliran listrik, artinya batuan atau mineral tersebut mempunyai elektron bebas sedikit, bahkan tidak ada sama sekali, tetapi karena adanya pengaruh medan listrik dari luar maka elektron dalam bahan berpindah dan berkumpul terpisah dari inti, sehingga terjadi polarisasi (Telford dkk., 1990).

Tabel 2. 1 Nilai Resistivitas Batuan (Telford dkk., 1990).

Material	Resistivitas (Ωm)
Udara	~
Pirit	0,1-100
Kwarsa	500-800000
Kalsit	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Garam Batu	$30 - 1 \times 10^{13}$
Granit	200-10000
Andesit	$1,7 \times 10^2 - 45 \times 10^4$
Basal	200-100000
Gamping	500-10000
Batu Pasir	200-8000
Batu Tulis	20-2000
Pasir	1-1000

Material	Resistivitas (Ωm)
Lempung	1-100
Air Tanah	0,5-300
Air Asin	0,2
Magnetit	0,01-1000
Kerikil Kering	600-1000
Aluvium	10-800
Kerikil	100-600

Berdasarkan tabel resistivitas, dapat dilakukan identifikasi sistem panas bumi dari hasil pemodelan data Magnetotelurik. *Reservoir* ditandai dengan *permeable rock* yang nilai resistivitasnya lebih tinggi dari *cap rock*. Salah satu contoh yaitu batu pasir pada *reservoir* dan lempung pada *cap rock*. Patahan dapat terlihat pada kontras resistivitas yang ditampilkan pada hasil pemodelan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

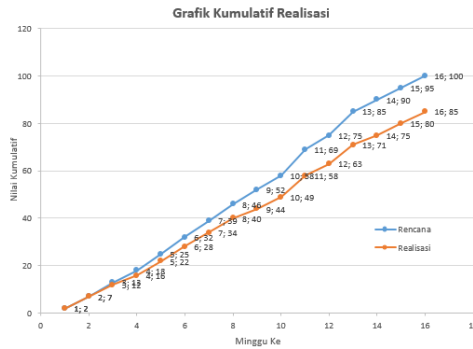
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jadwal Kegiatan

Penyusunan tugas akhir ini memiliki gambaran umum waktu pengerjaan sebagai berikut;

Tabel 3. 1 *Timeline* Pengerjaan dan Penyusunan Tugas Akhir

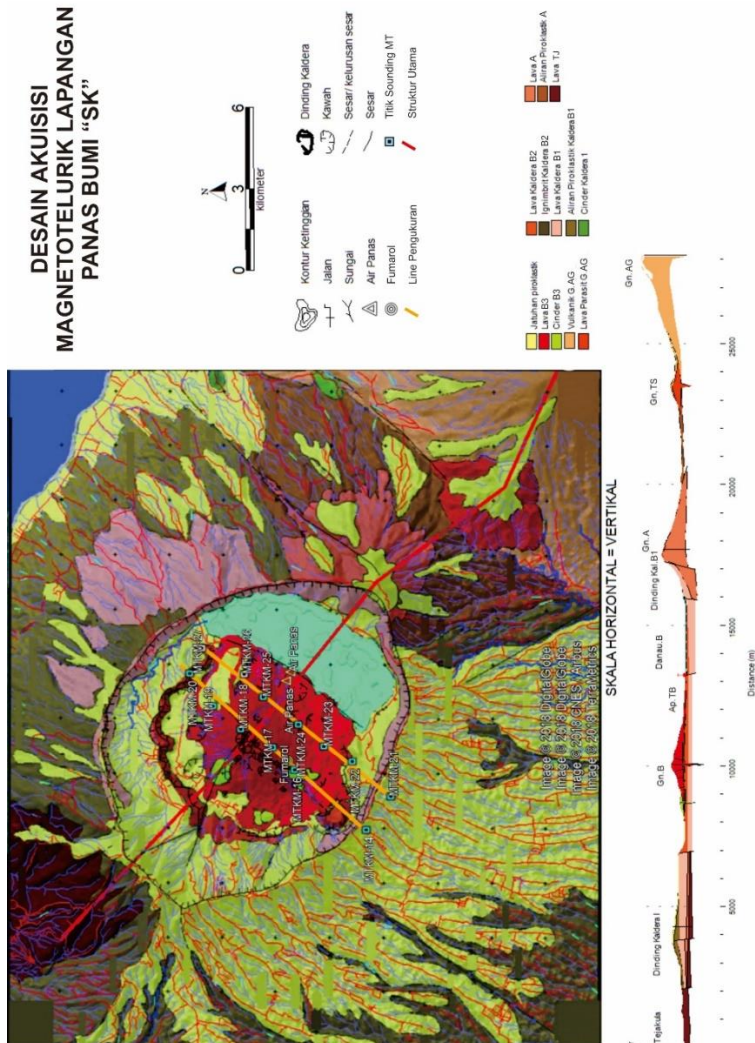
No	Kegiatan	Bobot	Minggu																Output
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	Studi Literatur	19	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Landasan teori dan dasar penelitian
2	<i>Filtering Time Series Data, FFT, dan Robust Processing</i>	3		3															Data domain <i>frequency lapangan</i> "SK"
3	<i>Crosspower & Statist Shift Correction</i>	8			4	4													Kurva TM dan TE
4	Pemodelan Inversi	24					6	6	6	6									Model 1D dan 2D
5	Analisis Model	15									5	5	5						Model 2D dengan pendekatan 1D
6	Interpretasi data	15										5	5	5	5				Model konseptual sistem panas bumi lapangan "SK"
7	Penyusunan Laporan Rencana	16													4	4	4	4	Laporan akhir
	Kumulatif Rencana		2	5	6	5	7	7	7	7	6	6	11	6	10	5	5	5	
	Kumulatif Rencana		2	7	13	18	25	32	39	46	52	58	69	75	85	90	95	100	
	Realisasi		2	5	5	4	6	6	6	6	4	5	9	5	8	4	5	5	
	Kumulatif Realisasi		2	7	12	16	22	28	34	40	44	49	58	63	71	75	80	85	
	Selish		0	0	1	2	3	4	5	6	8	9	11	12	14	15	15	15	



Gambar 3. 1 Grafik Kumulatif Rencana dan Realisasi.

3.2 Desain Akuisisi Data

Penelitian pada tugas akhir ini menggunakan data yang bersumber dari hasil akuisisi yang telah dilakukan oleh tim survey Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP). Desain akuisisi data dijelaskan pada gambar 3.1.



Gambar 3. 2 Desain Akuisisi Data Magnetotelurik Lapangan Panas Bumi “SK” Berdasarkan Pemetaan Citra Satelit Setelah di *Overlay* dengan Peta Geologi Regional.

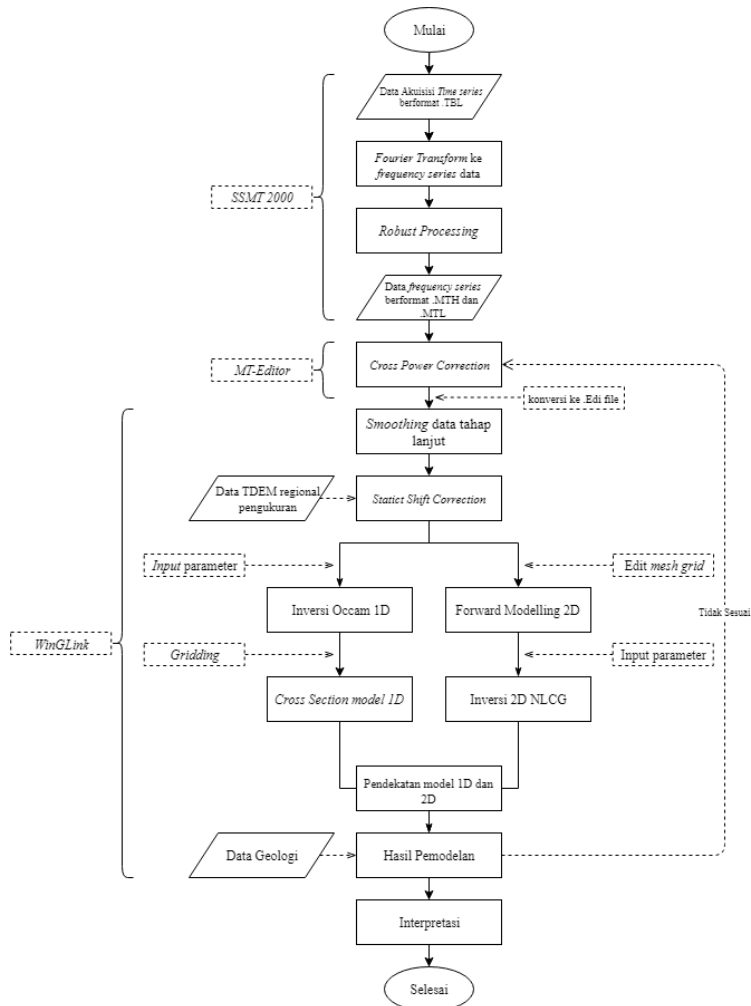
Desain akuisisi data magnetotelurik pada lapangan panas bumi “SK” dibuat sebanyak dua lintasan. Lintasan pertama memiliki enam titik pengukuran dan lintasan kedua memiliki tujuh titik pengukuran. Masing-masing titik pengukuran berjarak kurang lebih 1,5 kilometer dan panjang masing masing lintasan delapan kilometer.

Berdasarkan koordinat, lintasan 1 dan lintasan 2 membentang melewati tiga formasi yaitu Jatuhan Piroklastik, Lava “B3” dan Kaldera “B2”. Lintasan

pengukuran di buat sejajar dengan struktur pola aktivitas kawah “Gunung B” dari kawah 1 sampai kawah 3 yaitu dari Barat Daya–Timur Laut dan memotong tegasan utama Barat Laut-Tenggara. Pembuatan desain tersebut bertujuan untuk memenuhi kaidah TE dan TM agar memperoleh nilai E , H dan Z .

3.3 Diagram Alir

Prosedur pengolahan data magnetotelurik dari awal hingga interpretasi yang akan dilakukan penulis digambarkan melalui diagram alir dibawah ini;



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data Magnetotelurik.

3.3.1 *Fast Fourier Transform (FFT)* dan *Robust Processing* Menggunakan Perangkat Lunak SSMT 2000

The screenshot displays the SSMT 2000 software interface. The title bar reads "SSMT 2000: Robust Processing". The menu bar includes "File", "Edit", "Jobs", "Process", "Report", "Utility", "Plot", and "Help". The toolbar contains icons for "Copy Files", "Edit TBL", "View TBL", "View Time", "Edit PRM", "Save Job", "Load Job", "Run Job", "Make PFT", "TS to FT", "Process", and "Exit".

On the left is the "PHOENIX GEOPHYSICS" logo, featuring a stylized phoenix bird.

The main workspace is divided into four panels, each with a "Look in:" dropdown set to "e: [DATA]":

- Site Parameters (TBL):** Shows a tree view of folders: "Data-Mahasiswa" (containing "ANDRE-SKRIPSI" and "MTKM-27"), "COIL", and "MT5H". Below the tree are buttons for "Select All Site TBLs", "Deselect All Site TBLs", "Use TBL Folder", and "Time Series Viewer".
- Instrument Calibrations (CLB):** Shows a tree view of folders: "Data-Mahasiswa" (containing "ANDRE-SKRIPSI" and "MTKM-CAL"), "COIL", and "MT5H". Below the tree are buttons for "Use CLB Folder" and "View Calibrations".
- Sensor Calibrations (CLC):** Shows a tree view of folders: "Data-Mahasiswa" (containing "ANDRE-SKRIPSI" and "MTKM-CAL"), "COIL", and "MT5H". Below the tree is a checked checkbox for "Use CLB Folder".
- Fourier Parameters (PFT):** Shows a tree view of folders: "Data-Mahasiswa" (containing "ANDRE-SKRIPSI" and "MTKM-CAL"), "COIL", and "MT5H". Below the tree is a dropdown menu showing "MU55DN4D.PFT".

At the bottom, there are four panels for "Related Fcn Files":

- Site Parameters (TBL):** Contains a checked checkbox for "1940710C.TBL".
- Instrument Calibrations (CLB):** Contains checked checkboxes for "1940.CLB", "MT5C3301.CLB", "MT5C3302.CLB", "MT5C3295.CLB", and "MT5C3296.CLB".
- Sensor Calibrations (CLC):** Contains checked checkboxes for "MT5C3301.CLC", "MT5C3302.CLC", "MT5C3295.CLC", and "MT5C3296.CLC".
- Fourier Parameters (PFT):** Contains the text "Processing Parameters (PRM) (e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SKRIPSI-DAT)".

Gambar 3. 4 Tampilan Awal Perangkat Lunak SSMT2000.

Setelah input data selesai, dilanjutkan ke proses *Fast Fourier Transform* yang ada pada menu *Make PFT*. Kemudian akan ditampilkan *toolbox Fast Fourier Transform* seperti pada gambar 3.5.

MTU Processing MT(15Hz) data (SW ver. > A, Line Freq. = 50, MT sensors)

Input Data Type

☒ Measured field ☐ Parallel noise test

☐ White noise test ☐ Hourly files

Output Data Format

☒ 4 frequencies per octave

☐ 2 frequencies per octave

Bands (Levels)

☐ Process normal bands (levels) ☒ Process extended bands (levels)

☐ Process only band (level): 2 This band will be generated using TS5

Band (Level)	Starting Frequency	Frequencies in Top Octave	Number of Octaves	Record Interval	Overlap
2	--	--	--	--	--
3	352.94118	1	4	1	1
4	35	3	3	4	1
5	5	4	4	30	1
6	0.3125	4	5	60	2
7	0.00976562	4	5	600	4
8	0.00030518	4	5	1800	4

Processing Times

☒ Use default times

☐ Specify times Start from: 2013/07/10 05:05:02

End at: 2013/07/10 21:59:58

File name: MU55DE4D.PFT

Save Close

Gambar 3. 5 Setting Parameter FFT.

Pada toolbox *Make PFT* terdapat beberapa parameter. *Input data type* merupakan jenis data yang ingin di *input*. Penelitian pada tugas akhir ini menggunakan pengaturan *default* untuk *input data type*. Pengaturan *default* pada *toolbox* ini menampilkan *measured field* yang berarti data mentah hasil pengukuran lapangan tanpa ada *filtering* atau *noise test*. *Output data format* berfungsi sebagai mengatur jumlah oktav yang ditetapkan pada setiap pembagian frekuensi yang nantinya akan ditampilkan berupa *grid*. *Grid* tersebut dikenal dengan istilah *decade*. Pada pengaturan ini, peneliti menggunakan pengaturan 4 frekuensi per oktav yang nantinya akan membagi frekuensi dengan kelipatan 10 per *decade* nya. Kemudian dilanjutkan untuk *parameter bands*. Pada pengaturan ini dapat ditentukan lebar frekuensi yang akan di ditampilkan pada hasil FFT nantinya. Semakin lebar frekuensinya, maka keluaran data akan menampilkan hasil pengukuran pada frekuensi terkecil. Pada pengaturan ini, peneliti menggunakan pengaturan *process extend bands* untuk memperoleh data dengan frekuensi terkecil. Pada parameter *processing time*, dapat diatur waktu mulai dan berakhirnya pengukuran di lapangan. Penentuan waktu ini berpengaruh pada

lebar frekuensi yang akan ditampilkan pada hasil FFT nantinya. Prinsipnya, apabila dilakukan pemotongan data pada waktu berakhir pengukuran, maka data yang dipotong adalah data pada frekuensi terkecil, dan sebaliknya. Pengaturan waktu dilakukan secara *default* yaitu sesuai dengan waktu mulai dan berakhirnya pengukuran dilapangan. Setelah dilakukan *setting* parameter, data disimpan dan dilakukan FFT untuk mendapatkan data dengan ekstensi .PFT.

Proses berikutnya yaitu *robust processing*. Pada dasarnya, prinsip *robust processing* hampir mirip dengan prinsip *least-square* biasa, yaitu mencari *trend data* yang lebih dominan dan meminimalisir pengaruh *outlier* pada data. *Robust processing* membagi data *time series* kedalam segmen-segmen dengan ukuran yang sama. Setiap segmen diolah sehingga menghasilkan satu data parsial atau lebih dikenal dengan istilah *crosspower* dari satu titik data respon fungsi transfer. Pada *robust processing* ini akan menghasilkan data berformat . MTH dan . MTL yang selanjutnya akan dibuka pada perangkat lunak *MT-Editor*. *Robust Processing* terdapat pada menu *Processing* yang ditampilkan seperti seperti pada gambar 3.6.

Gambar 3. 6 Setting Parameter Robust Processing.

Parameter yang digunakan dalam *robust processing* meliputi *Reference Type*, *Select Frequencies*, *Coherency processing*, *Rho Variance Processing*, dan *Set Crosspower Parameter*. *Reference type* merupakan pemilihan referensi data yang akan diproses, untuk pengolahan ini menggunakan jenis referensi *Local H*

pada stasiun pengukuran magnetotelurik. Jangkauan frekuensi yang digunakan dibuat secara default pada parameter robust. Untuk koherensi frekuensi dan ρ variance diatur secara *default*. Koherensi frekuensi merupakan pembobotan data *time series* berdasarkan koherensi antara kurva medan elektrik dan magnetik, agar diperoleh nilai koherensi yang optimum. Idealnya koherensi antara dua kurva tersebut mendekati angka satu. Sedangkan untuk ρ variance merupakan pembobotan data *time series* berdasarkan perubahan nilai ρ pada *robust processing*.

Selanjutnya diatur jumlah pemilihan *crosspower* pada *Set Crosspower Parameter*. Semakin besar jumlah *crosspower* nya akan dihasilkan model kurva medan magnet dan listrik semakin rapat sehingga menghasilkan model kurva yang lebih halus polanya. Penelitian pada tugas akhir ini menggunakan *crosspower* dengan jumlah 50 pada masing-masing titik kurva. Semua parameter tersebut disimpan, kemudian dilakukan *robust processing* seperti pada gambar 3.7.

```
Microsoft Windows [Version 10.0.15063]
C:\>SET READ PROGRAM: VERSION:R2022-0216-B22
SETUP DFT PROCESSING PARAMETERS Type: *.MTH
Data: 1 Chan: 5 XPos: 50 From: 100
e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.TBL
f:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27
C:\MT-SSMTU-REF
Chan Ind: 101 102 103 104 105 0 0
RefType: 3 Freq: All Fcn Frequencies.
RefType: 2 Cutoff: 0.000000E+00
RefType: 1 NotRef: 0.000000E+00
RefMin: 0.8500000 RefMax: 0.3500000
VerMin: 0.7500000 VerMax: 0.2500000

File Name:e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.FC3
File Name:e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.FC4
File Name:e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.FC5
File Name:e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.FC6
File Name:e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.FC7
File Name:e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.FC8

TStoT Ver: 38 INFO Name:
e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.INF
Chan Names: SEk1SEy1SHw1SHy1SHz1
RefFid: 1 2 3 4 5 3 4
Mti 1 lat Win Index:H 4FCC488
Mti 1 lat Win Index:HREC480
Mti 1 lat Win Index:HIFCB91FC
Mti 1 lat Win Index:H3F97240
Mti 1 lat Win Index:H 3F972C
Mti 1 lat Win Index:H 1FC02
Mti 1 RecNum: 1 1 1 1 1 1 1
1
All Files are Synchronized.
I/O Name:E:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\MTM-27a.MT
OPEN File:e:\Data-Mahasiswa\ANDRE-SERIPSI-DATA\MTM-27\1940710C.FC3
Rec: 1 Window: H 4FCC488 Win Count: 0140
```

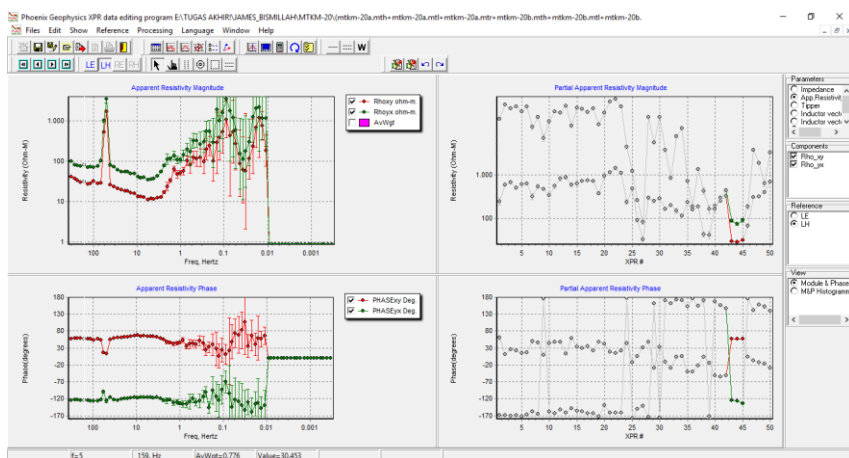
Gambar 3. 7 Robust Processing.

3.3.2 Crosspower Correction Menggunakan Perangkat Lunak MT-Editor

Hasil dari *Robust Processing* pada *SSMT2000* berupa data dengan ekstensi .MTH dan .MTL. Data tersebut berisikan kurva resistivitas semu dan fase yang terdiri dari kurva TE dan TM di layar sebelah kiri. Setiap kurva terdapat titik-titik yang merupakan data per frekuensi. Titik titik tersebut yang akan dilakukan seleksi *crosspower* yang ditampilkan di sebelah kanan layar. Pada data tersebut, terdapat kurva nilai resistivitas semu dan fase. Berdasarkan semua data pada setiap titik pengukuran, data memiliki range frekuensi dari 300 Hz hingga 10^{-3}

Hz dan nilai resistivitas memiliki *range* $1-10^6 \Omega\text{m}$. Data tersebut memiliki lima *decade* dengan patokan per satu *decade* yaitu frekuensi dengan kelipatan 10. Data tersebut masih memiliki *noise* yang tidak sesuai dengan *trend* data kurva sehingga harus dilakukan *crosspower correction*.

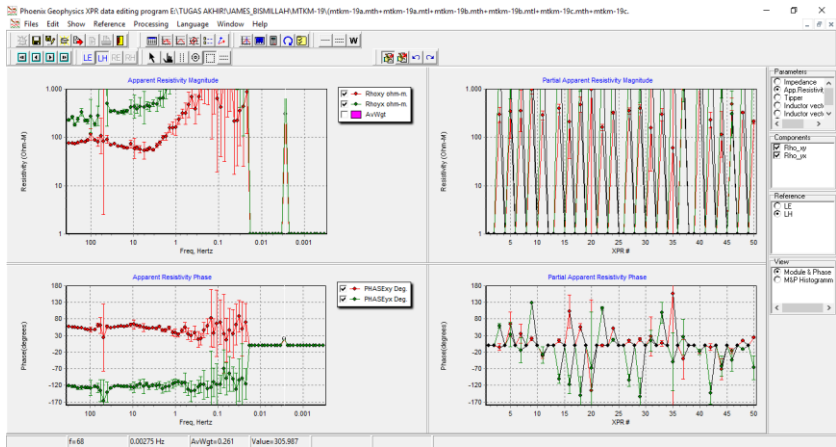
Pada *crosspower correction*, perlu diperhatikan *trend* data dengan teliti. Seleksi pemilihan *crosspower* yang di aktifkan harus mengikuti *trend* data kurva pada titik sebelumnya. Data yang memiliki *error bar* tinggi akan menampilkan bentuk *crosspower* yang memiliki rentang nilai resistivitas yang sangat lebar dengan susunan yang sangat berantakan. *Trend* data fase dan resistivitas semu berperan penting dalam seleksi pengaktifan *crosspower*.



Gambar 3. 8 Data dengan *Error Bar* Tinggi

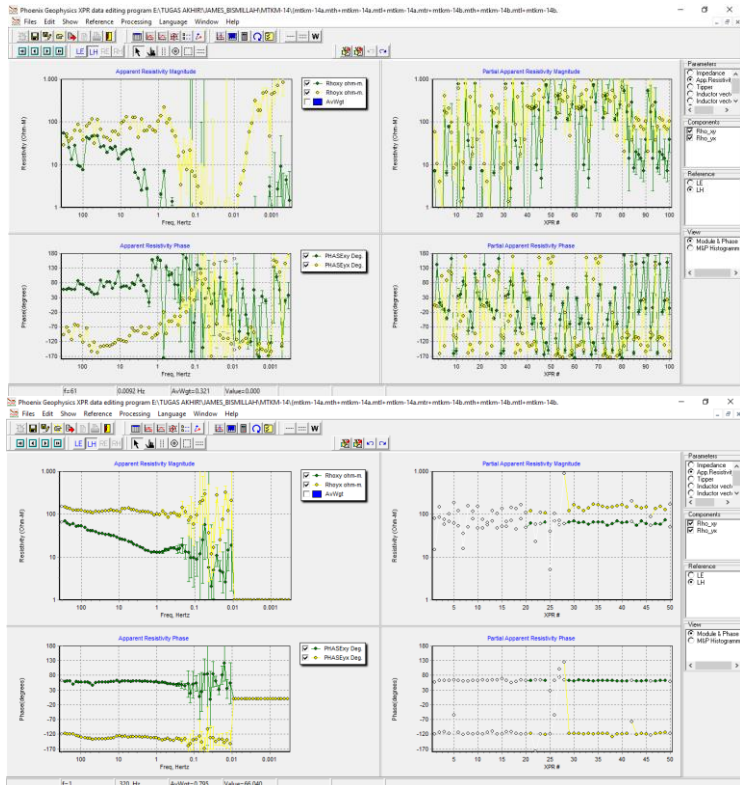
Pada data dengan *high error bar*, perlu diperhatikan *trend* data dan fase dengan sangat teliti. *Error Bar* disebabkan oleh *noise* pada data yang menyebabkan rentang nilai resistivitas semu menjadi lebar sehingga menyebabkan ambiguitas. Pemilihan *crosspower* harus saling memperhatikan kurva resistivitas semu dan fase. Pemilihan *crosspower* nilai resistivitas semu tidak selamanya berpatokan pada nilai yang dominan karena juga harus mempertimbangkan nilai fase yang konstan dan mengikuti *trend data*.

Pada frekuensi 10^{-2} hingga 10^{-4} Hz tidak terdapat satupun nilai yang stabil sehingga semua *crosspower* dimatikan pada frekuensi tersebut. Hal ini disebabkan karena sinyal gelombang elektromagnetik yang semakin melemah pada frekuensi yang kecil dan kedalaman yang semakin dalam, sehingga data yang diperoleh tidak representatif.



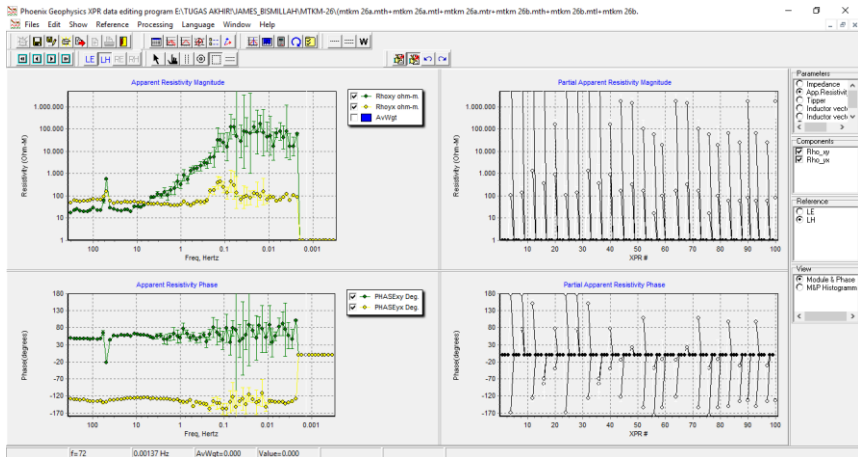
Gambar 3. 9 Kondisi Data Pada Frekuensi 10^{-2}

Selama proses *crosspower correction*, hal yang perlu diperhatikan adalah perubahan fase dan resistivitas semu pada kurva ketika dilakukan penghilangan *crosspower*. Kedua kurva ini akan bergerak bersamaan ketika penghilangan satu *crosspower* pada titik kurva yang sedang dilakukan pengeditan. Pemodelan yang dihasilkan tergantung pada *trend* data yang telah ditetapkan dari proses pengeditan. Naik dan turunnya kurva resistivitas semu menentukan jumlah lapisan yang dapat teridentifikasi. Idealnya, kurva TE dan TE memiliki posisi yang saling berhimpit dan fase yang stabil. Gambar 3.10 akan menampilkan hasil dari *crosspower correction*.



Gambar 3. 10 Kurva TE (hijau) dan TM (kuning) Sebelum (atas) dan Sesudah (bawah) Proses *Crosspower Correction*.

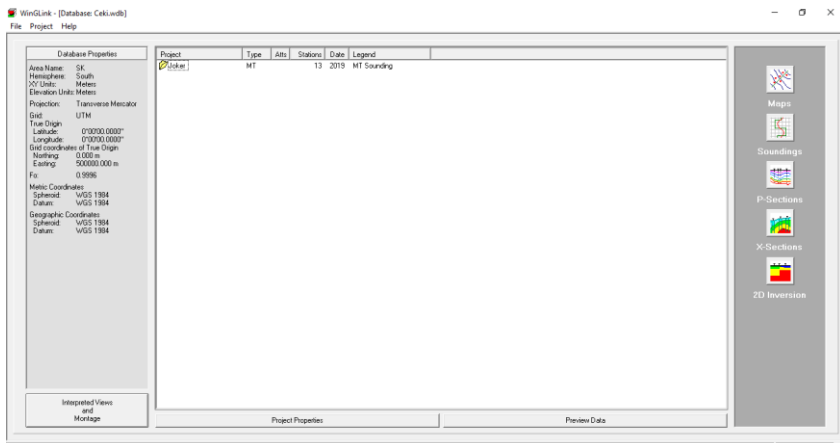
Setelah dilakukan *crosspower correction* pada semua data, dapat dilakukan analisis data yang akan dilakukan pengolahan berikutnya. Data cenderung memiliki *trend* dari rendah ke tinggi untuk nilai resistivitas semu, dan konstan untuk nilai fase. Nilai resistivitas semu berada pada rentang $1-10^4 \Omega m$ dengan rentang frekuensi $300-10^{-1} \text{ Hz}$. Bentuk kurva cenderung memiliki pola yang sama antara kurva TE dan TM, kecuali pada titik MTKM-14, MTKM-21, MTKM-24, dan MTKM-26. Kondisi dari keempat data tersebut dapat disebut tidak ideal karena kurva TE dan TM memiliki *trend* data yang berbeda.



Gambar 3. 11 Data dengan Kondisi yang Tidak Ideal

3.3.3 Smoothing Data Tahap Lanjut dan Static Shift Correction Pada Perangkat Lunak WinGLink

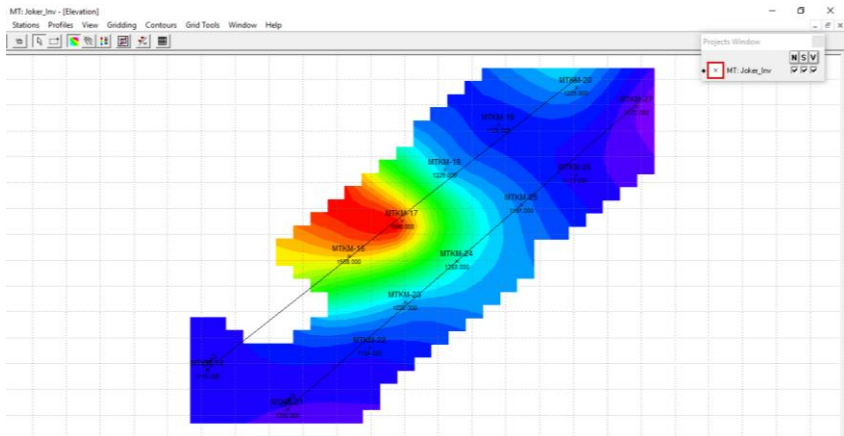
Setelah dilakukan *crosspower correction* pada perangkat lunak *MT-Editor*, data disimpan dalam format .EDI untuk dapat dibuka pada perangkat lunak *WinGLink*. Pada perangkat lunak *WinGLink*, hal yang dilakukan pertama adalah membuat *project* dengan meng-import data .EDI.



Gambar 3. 12 Tampilan Awal Perangkat Lunak WinGLink.

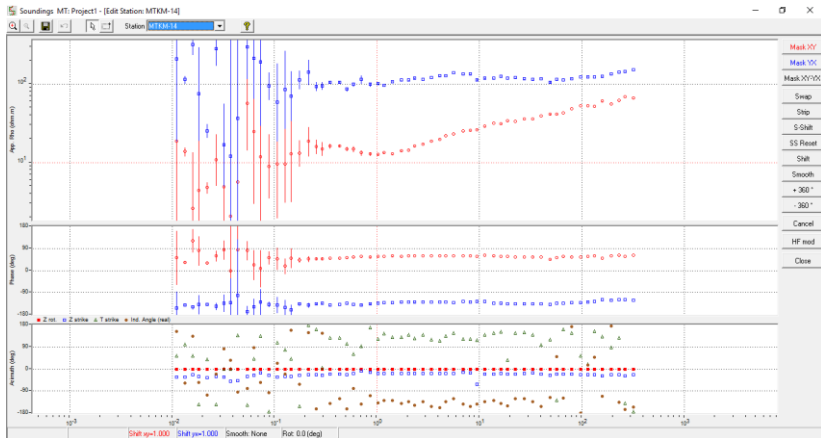
Sebelum melakukan *smoothing* tahap lanjut, data .EDI yang telah di *import* ke *project* dilakukan *ploting* koOrdinat pada peta. Setelah dilakukan *ploting*

koordinat, akan dihasilkan peta elevasi wilayah pengukuran. Kemudian dilakukan *profiling* pada peta sesuai titik pengukuran. Proses ini berguna sebagai menentukan wilayah yang akan dilakukan permodelan. Peta elevasi tersebut menggambarkan desain akuisisi dari data yang akan diolah.



Gambar 3. 13 Peta Elevasi Lintasan.

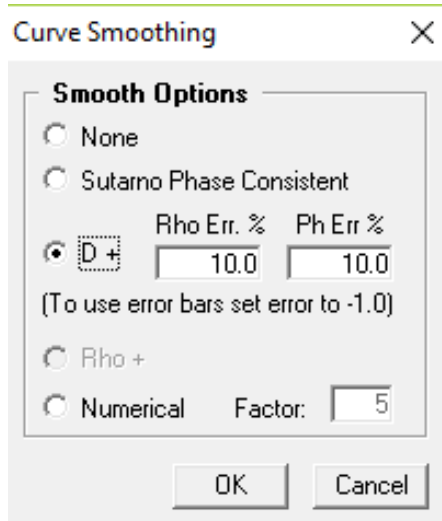
Setelah dibuat peta elevasi, dilanjutkan ke proses *smoothing* data pada menu *sounding*. Pada proses ini, dapat dilakukan dengan metode *masking* dan *shifting* pada titik yang belum sesuai dengan *trend* kurva atau titik yang dianggap sebagai noise. Penelitian pada tugas akhir ini menggunakan metode *shifting* yaitu dengan menggeser titik-titik yang keluar dari *ternd data*. Pemilihan metode *shifting* ini dikarenakan data yang memiliki nilai *error bar* yang tinggi pada frekuensi 1 hingga 10^{-1} Hz. Apabila *smoothing* dilakukan dengan metode *masking* atau mematikan titik yang dianggap sebagai *noise*, *trend* data pada frekuensi $1-10^{-1}$ Hz akan berubah atau hilang. *Smoothing* menggunakan metode *shifting* ini diperlukan interpretasi terhadap pola kurva yang di tampilkan untuk mempertahankan *trend* data yang sesuai dengan data asli. Data sebelum dilakukan *smoothing* ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Kurva TE (merah) dan TM (biru) Sebelum *Smoothing* dan *Static Shift Correction*.

Interpretasi *trend* kurva dilakukan dengan melihat pola nilai resistivitas semu pada setiap frekuensi. Dengan melihat pola dominan yang terdapat pada kurva, dapat dilakukan *smoothing* mengikuti pola kurva tersebut. Hal lain yang dipertimbangkan adalah konsep geologi dari sistem panas bumi. Nilai resistivitas semu akan cenderung tinggi pada frekuensi rendah karena semakin rendah frekuensi, makin nilai resistivitas yang diperoleh adalah nilai resistivitas pada kedalaman yang lebih dalam dari nilai resistivitas pada frekuensi rendah. Semakin dalam penetrasi bawah permukaan bumi, semakin tinggi nilai resistivitasnya, dan begitu juga sebaliknya.

Berdasarkan data pada pengolahan sebelumnya, kurva yang mengalami kenaikan resistivitas berada pada rentang frekuensi $50\text{-}10^{-1}$ Hz dengan rentang nilai resistivitas semu $10^2\text{-}10^3 \Omega\text{m}$. Kemudian dilakukan *shifting* dengan memperhatikan kenaikan masing-masing kurva. *Trend* masing-masing kurva diperhatikan satu per satu antara TE dan TM karena tidak selamanya kurva TE dan TM memiliki posisi yang berhimpit dan memiliki pola yang sama. Hal tersebut dikarenakan oleh faktor lapangan pengukuran serta kemampuan TE dan TM dalam memetakan struktur bawah permukaan. Setelah proses *smoothing*, dibuat kurva *smoothing* dari kurva hasil *editing* dengan berbagai metode seperti yang ditunjukkan seperti pada gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Setting Parameter Smoothing.

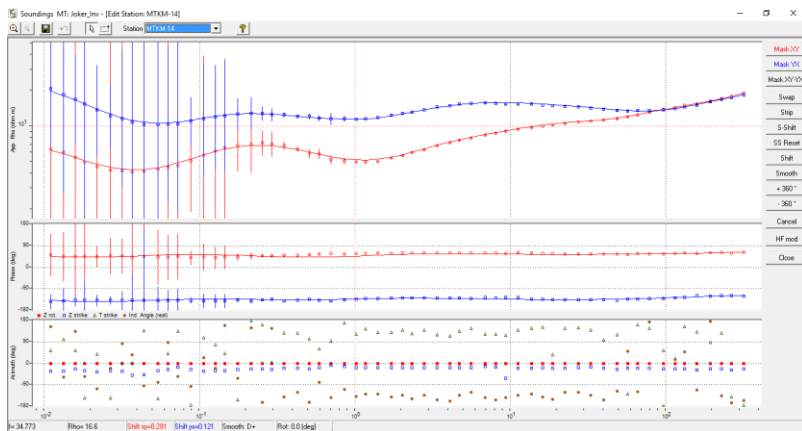
Metode *Sutarno Phase Consistent* membuat kurva *smoothing* berdasarkan nilai fase yang dianggap konsisten. Metode *D+* membuat kurva *smoothing* berdasarkan nilai pada kurva TE-TM dan kurva fase dengan batas error yang ditentukan pada masing-masing kurva. Sedangkan metode *numerical* membuat kurva *smoothing* yang sesuai dengan kurva editing dengan faktor *smoothing* yang dapat ditentukan. Penelitian pada tugas akhir ini menggunakan metode *numerical* untuk *smoothing* kurva karena kondisi data yang memiliki *high error bar*. Apabila dilakukan *smoothing* dengan metode *D+* atau *sutarno phase consistent*, kurva *smoothing* yang dihasilkan kurva yang tidak sesuai dengan kurva observasi.

Setelah dilakukan *smoothing*, dilakukan *static shift correction* pada kurva TE dan TM. Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan efek statik pada data. Efek statik menyebabkan kurva TE dan TM menjadi terpisah yang idealnya dalam kondisi berhipmit. *Static shift correction* dilakukan menggunakan data *Time Domain Elektromagnetic* (TDEM). TDEM adalah metode elektromagnetik aktif yang memanfaatkan difusi dari gelombang elektromagnetik untuk membedakan lapisan di bawah permukaan berdasarkan perbedaan nilai konduktivitas atau resistivitas batuan. Pengukuran TDEM dilakukan pada frekuensi diatas 100 Hz yang hasilnya akan lebih akurat pada lapisan dangkal. Data TDEM yang digunakan bersumber dari PSDMBP dengan nilai frekuensi 100 Hz.

Tabel 3. 2 Data Hasil Pengukuran TDEM.

Data TDEM ($f = 100\text{Hz}$)	
TDEM-14	14.786
TDEM-16	60.347
TDEM-17	50.269
TDEM-18	37.201
TDEM-19	52.230
TDEM-20	48.579
TDEM-21	24.942
TDEM-22	43.908
TDEM-23	44.611
TDEM-24	38.528
TDEM-25	50.652
TDEM-26	37.745
TDEM-27	46.300

Static shift correction menggunakan data TDEM ini dilakukan dengan menggeser kurva TE dan TM yang berpatokan pada titik di frekuensi 100 Hz sehingga kurva akan berhimpit pada frekuensi 100 Hz dan titik kurva lainnya mengikuti polanya masing-masing.



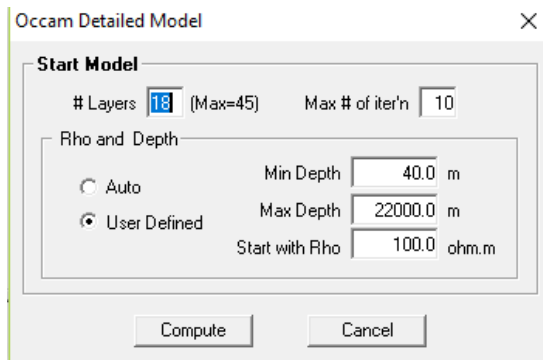
Gambar 3. 16 Kurva TE (merah) dan TM (biru) Setelah *Smoothing* dan *Static Shift Correction*.

3.3.4 Pemodelan 1D Metode *Occam*

Proses selanjutnya yaitu membuat model 1D. Pada perangkat lunak *WinGLink*, pemodelan 1D dapat dilakukan dengan metode *Occam*. Pemodelan 1D dapat dibuat berdasarkan kurva hasil *editing* atau *smoothing*. Penelitian pada tugas akhir ini menggunakan kurva *smoothing* untuk pemodelan 1D. Kurva yang digunakan untuk pemodelan dapat ditentukan menggunakan kurva TE, TM atau *Invariant*. Kurva *invariant* adalah kurva yang dihasilkan dari nilai tengah kurva TE dan TM.

Pada penelitian ini, kurva yang digunakan untuk melakukan pemodelan adalah kurva TE karena secara teori dasar, modus TE lebih mampu dalam memetakan nilai resistivitas secara vertikal ke dalam dibandingkan dengan modus TM yang mampu memetakan resistivitas lebih akurat secara lateral. Pada *line 1*, titik MTKM-14, kurva TE dan TM tidak berhimpit tetapi, nilai resistivitas yang terdapat di kurva tersebut berada pada *cluster* yang sama dari frekuensi awal hingga akhir yaitu 0-100 Ωm . Pada *line 2*, titik MTKM-21 kurva TE dan TM memiliki *trend* yang sama tetapi kenaikan resistivitas yang berbeda pada frekuensi rendah, dimana kurva TE memiliki nilai resistivitas hingga 100 Ωm pada frekuensi rendah, sedangkan kurva TM tidak lebih dari 10 Ωm pada frekuensi rendah. Titik MTKM-24 memiliki kurva TE dan TM yang sangat berbeda serta jauh dari kondisi ideal. Titik MTKM-26 memiliki *trend* kurva yang sama akan tetapi nilai yang jauh berbeda. Kurva yang lebih representatif berdasarkan *trend* kurva dari data lainnya dan idealnya nilai resistivitas bawah permukaan adalah kurva TE.

Parameter pemodelan inversi *Occam* 1D dapat dilihat pada gambar 3.17.

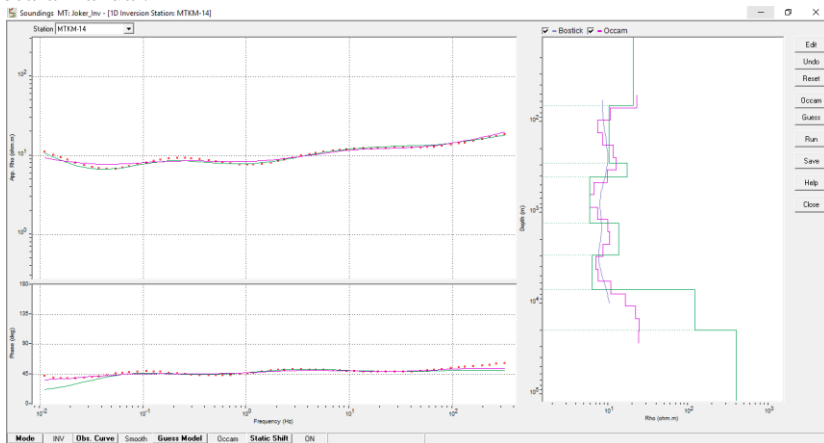


Gambar 3. 17 Setting Parameter Pemodelan *Occam* 1D.

Parameter inversi *Occam* terdiri dari jumlah lapisan, iterasi, *start resistivity*, dan kedalaman. Jumlah lapisan ditentukan secara default oleh perangkat lunak *WinGLink*. Perangkat lunak *WinGLink* dapat menentukan lapisan sesuai dengan kondisi kurva. Semakin banyak kenaikan dan penurunan nilai resistivitas pada

kurva, maka lapisan yang akan ditentukan oleh perangkat lunak *WinGLink* akan semakin banyak. Iterasi ditentukan secara *default* oleh perangkat lunak *WinGLink* dengan maksimal iterasi yaitu 10.

Penentuan kedalaman dapat dilakukan dengan menggunakan rumus *skin depth*. Kedalaman awal dan akhir dapat ditentukan dengan memasukkan frekuensi terbesar dan terkecil pada data kedalam rumus *skin depth*. Jika dilakukan dengan mode *automatic*, perangkat lunak *WinGLink* juga dapat menentukan kedalaman awal dan akhir yang sesuai dengan perhitungan dengan rumus *skin depth* tetapi *start resistivity* juga ditentukan *automatic* sehingga tidak dapat diubah. *Start resistivity* ditentukan berdasarkan frekuensi dominan pada kurva. Pada penelitian ini, penentuan kedalaman dan *start resistivity* dilakukan secara manual.



Gambar 3. 18 Hasil Pemodelan *Occam* 1D.

Setelah didapatkan hasil pemodelan *Occam*, dilakukan penentuan nilai resistivitas dan kedalaman yang representatif dengan kurva observasi.

1D Model Parameters

Total # of layers (max = 8)

#	Fixed	Resistivity	Fixed	Thickness
1	<input checked="" type="checkbox"/>	20.40	<input type="checkbox"/>	65.85
2	<input checked="" type="checkbox"/>	10.08	<input checked="" type="checkbox"/>	220.06
3	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	<input checked="" type="checkbox"/>	115.42
4	<input checked="" type="checkbox"/>	5.81	<input checked="" type="checkbox"/>	891.58
5	<input checked="" type="checkbox"/>	13.48	<input checked="" type="checkbox"/>	1616.35
6	<input checked="" type="checkbox"/>	6.25	<input checked="" type="checkbox"/>	4092.83
7	<input checked="" type="checkbox"/>	120.36	<input checked="" type="checkbox"/>	12545.55
8	<input type="checkbox"/>	400.98		

Buttons: Insert, Delete, Import, Guess

Inversion Parameters

☒ Amplitude + Phase ☐ Amplitude Only

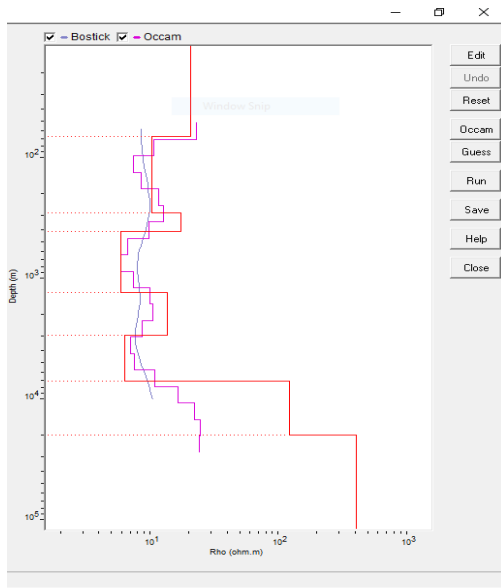
Max R.M.S. (%)

Max # of iterations

Buttons: OK, Cancel

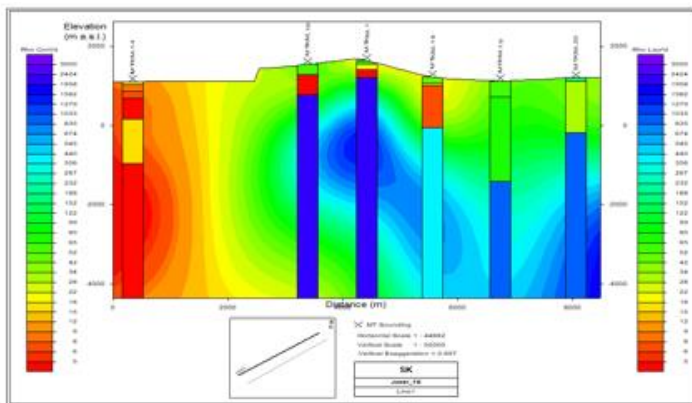
Gambar 3. 19 Setting Penentuan Nilai Resistivitas dan Kedalaman Pemodelan 1D.

Penentuan ini bertujuan untuk memeriksa kembali hasil inversi *Occam* 1D dengan melihat nilai kedalaman dan resistivitas yang representatif dengan kurva observasi. Pada perangkat lunak *WinGLink*, pemodelan 1D metode *Occam* memiliki kelemahan pada penentuan model frekuensi rendah. Hasil pemodelan inversi *Occam* cenderung mengalami penurunan resistivitas pada frekuensi rendah bagian akhir. Pada kasus tersebut, solusi yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan penetapan hasil pemodelan berdasarkan kedalaman. Hasil pemodelan 1D metode *Occam* yang representatif dengan kurva *smoothing* ditetapkan dengan kedalaman maksimal 4000 meter. Gambar 3.20 berikut adalah hasil pemodelan 1D metode *Occam*.



Gambar 3. 20 Hasil Akhir Pemodelan Inversi 1D Metode Occam.

Selanjutnya, hasil pemodelan 1D di korelasikan pada masing-masing data yang berada pada satu lintasan pengukuran. Korelasi dari hasil pemodelan 1D tersebut dikenal dengan istilah *cross section modelling*. Parameter yang terdapat dalam *cross section modelling* ini adalah faktor interpolasi. Berikut adalah hasil *cross section* dari hasil pemodelan 1D dengan faktor interpolasi minimum yaitu lima.

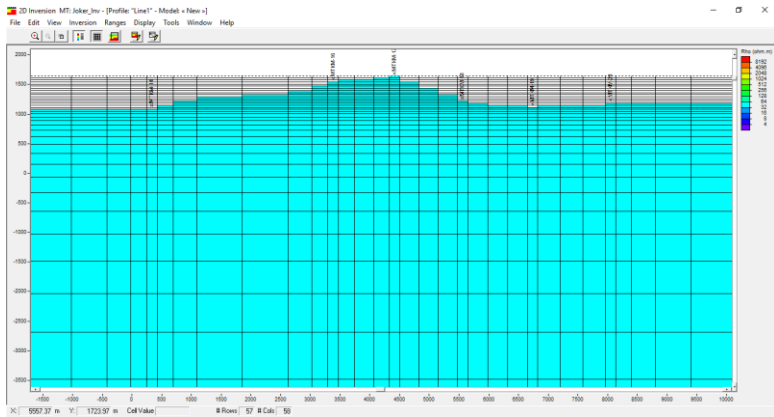


Gambar 3. 21 Hasil *Cross Section* Pemodelan 1D.

3.3.5 Pemodelan 2D Metode *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG)

3.3.5.1 *Forward Modelling* 2D

Proses selanjutnya yaitu membuat pemodelan 2D dari data. Pada perangkat lunak *WinGLink*, Metode pemodelan 2D menggunakan metode *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG). Langkah awal dari pemodelan tersebut adalah dengan membuat *forward modelling* penampang resistivitas dengan nilai resistivitas yang dianggap homogen. *Forward modelling* dibuat dengan memasukkan parameter jumlah *decade*, *start resistivity* berdasarkan nilai resistivitas dominan pada kurva, dan koreksi topografi *Decade* pada kurva berjumlah lima *decade* dengan *range* frekuensi 10^{-1} , 10^0 , 10^1 , 10^2 , dan $>10^2$ sedangkan *start resistivity* ditetapkan dengan nilai 50 Ωm . Nilai *decade* dan *start resistivity* tersebut berlaku untuk kedua *line*. Koreksi topografi diatur otomatis oleh perangkat lunak *WinGLink* yang disesuaikan dengan koordinat pengukuran. Hasil *forward modelling* ditunjukkan pada gambar 3.22.



Gambar 3. 22 Model Awal Penampang Resistivitas 2D.

Parameter lainnya yaitu menentukan nilai resistivitas minimum dan maksimum. Nilai resistivitas minimum ditetapkan berdasarkan nilai resistivitas paling rendah pada setiap kurva, begitu juga dengan nilai maksimum. Nilai resistivitas minimum berada pada 1 Ωm dan nilai resistivitas maksimum berada pada 3000 Ω untuk *line 1*. Sedangkan, untuk *line 2* berada pada nilai 1 Ωm untuk resistivitas minimum, dan 5000 Ωm untuk resistivitas maksimum. Kemudian, ditentukan nilai *data error* dan *error floor*. *Data error* adalah toleransi *error* pada data hasil dari proses inversi. *Error floor* adalah toleransi *error* pada proses inversi yang ditentukan, sehingga apabila proses inversi melebihi batas *error floor* yang ditentukan maka proses inversi akan berhenti secara otomatis. Nilai *data error* dan *error floor* ditentukan dengan nilai 5% untuk ρ , dan 10% untuk *phase*. Nilai tersebut adalah nilai ideal berdasarkan *manual book* dari *WinGLink*.

Pada penelitian ini, modus inversi yang digunakan adalah modus TE-TM. Modus TE-TM sendiri adalah modus inversi dimana hasil pemodelannya berdasarkan dari kedua kurva yaitu kurva TE dan TM. Hasil pemodelan menggunakan modus TE-TM ini merupakan hasil inversi yang lebih kompleks dibandingkan dengan menggunakan salah satu modus saja yaitu TE atau TM saja. Modus TE-TM mempertimbangkan juga mempertimbangkan dari kualitas masing-masing kurva untuk mengidentifikasi bawah permukaan serta memenuhi sifat gelombang elektromagnetik dari pengolahan data magnetotelurik. Selain itu, hal yang dipertimbangkan pada penelitian ini untuk menggunakan modus TE-TM adalah kondisi data yang tidak mencapai kondisi ideal pada beberapa titik. Setelah menentukan modus yang digunakan, ditentukan modus koreksi statik yang digunakan. Koreksi statik yang digunakan harus sama dengan modus inversi yang digunakan yaitu TE-TM.

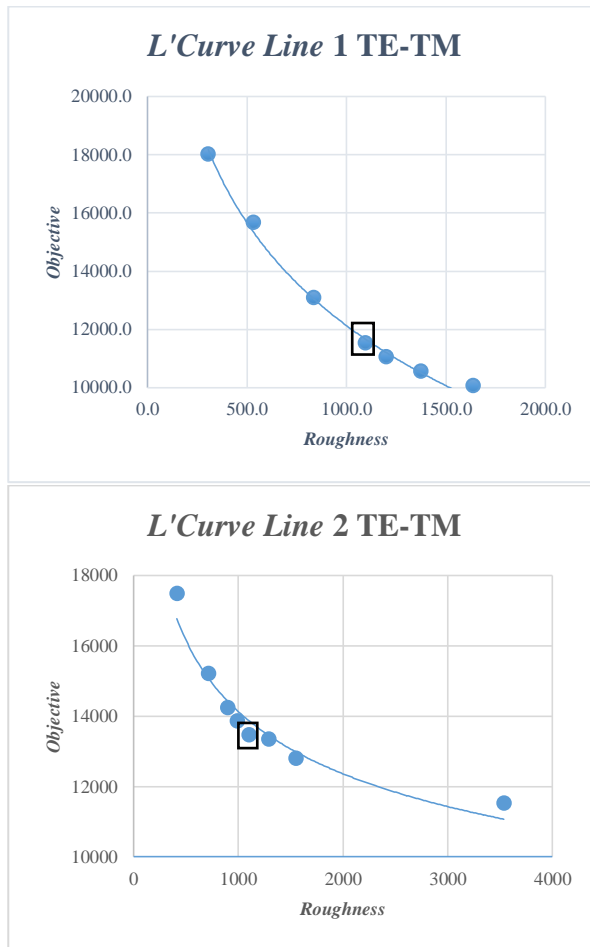
3.3.5.1 Metode *L'Curve*

Tau merupakan parameter regularisasi yang berfungsi sebagai pembobot antara data dan model. Parameter ini adalah sebagai pengontrol *roughness* model. Sehingga hal ini berkaitan dengan hasil fungsi objektif. Semakin kecil nilai *tau* maka model akan mempunyai nilai *roughness* yang besar dan juga sebaliknya yakni, semakin besar nilai *tau* maka model mempunyai nilai *roughness* kecil. Untuk itu perlu diberikan nilai *tau* yang optimum dengan menggunakan *L'Curve*. Metoda *L'Curve* merupakan solusi optimasi data hasil inversi dengan variasi nilai *tau* yang berbeda. Pada penelitian ini nilai *tau* yang dimasukkan adalah 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 10, 20. Berikut adalah tabel nilai *tau* berbanding dengan *roughness*, *objective* dan *RMS error*.

Tabel 3. 3 Perbandingan nilai *RMS*, *Roughness*, dan *Objective* Sebagai Parameter *L'Curve*

<i>Line 1 TE-TM</i>				<i>Line 2 TE-TM</i>			
<i>Tau</i>	<i>RMS</i>	<i>Roughness</i>	<i>Objective</i>	<i>Tau</i>	<i>RMS</i>	<i>Roughness</i>	<i>Objective</i>
0.5	2.524	1748.2	8918.2	0.5	2.720	3535.6	11515.7
1.5	2.600	1637.2	10062.4	1.5	2.817	1550.6	12783.8
2	2.635	1372.2	10559.6	2	2.858	1290.7	13341.4
2.5	2.676	1199.9	11056.5	2.5	2.851	1102.6	13462.5
3	2.707	1094.0	11529.5	3	2.874	991.7	13859.5
5	2.814	834.6	13085.2	3.5	2.902	896.5	14234
10	3.032	531.7	15659.5	5	2.971	715.1	15205.4
20	3.258	303.6	18014.1	10	3.184	412.6	17474.9

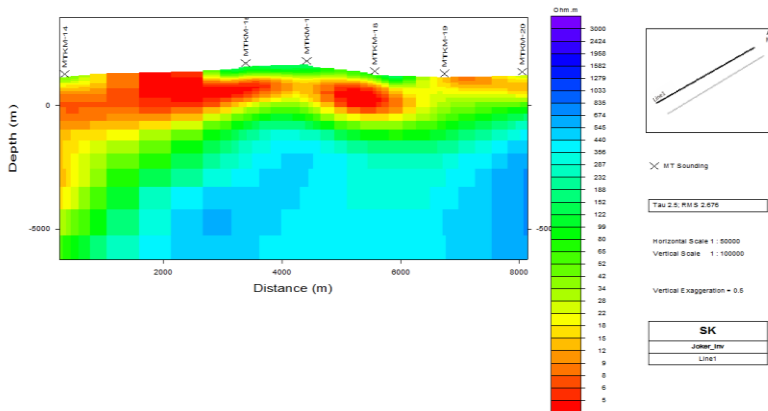
Berdasarkan tabel tersebut, dibuat *L'Curve* dengan memasukkan parameter *roughness* dan *objective* seperti berikut;



Gambar 3. 23 *L'Curve Line 1* (atas) dan *Line 2* (bawah).

Dari delapan percobaan nilai *tau* dengan parameter inversi lain yang bernilai sama, nilai optimum *tau* didapatkan pada nilai 2.5 untuk *line 1* dan 2. Nilai optimum tersebut dapat dilihat pada tabel 3.3. Nilai *tau* atau parameter regularisasi pada algoritma NLGC yaitu meminimumkan fungsi objektif. Fungsi objektif akan semakin besar apabila nilai *tau* juga semakin besar. Nilai tersebut berbanding lurus dengan nilai *RMS* akan tetapi berbanding terbalik dengan nilai *roughness* atau kekasaran model. Nilai *tau* ideal yang dibutuhkan untuk pemodelan ini yaitu nilai yang memiliki fungsi objektif yang kecil dengan nilai *roughness* dan *RMS* yang kecil juga. Berdasarkan tabel 3.3, nilai *tau* pada 2,5

yang memenuhi syarat tersebut. Pengoptimuman model juga dipengaruhi oleh faktor iterasi inversi. semakin banyak iterasi yang dilakukan, nilai *RMS error* akan semakin kecil akan tetapi belum tentu representatif. Pada proses iterasi, akan terlihat pola penurunan *RMS error* pada masing-masing iterasi. Pemilihan jumlah iterasi dilihat berdasarkan pola penurunan tersebut. Penelitian ini menetapkan jumlah iterasi sebanyak 30 kali karena penurunan *RMS error* yang signifikan terhenti pada iterasi ke 30. Sedangkan, pada iterasi 30 keatas, penurunan *RMS error* hanya terjadi pada desimal ke empat, sehingga jika nilai *RMS error* pada iterasi 30 keatas dibulatkan menjadi 2 desimal, sama seperti nilai *RMS error* pada iterasi ke 30. Hasil Pemodelan 2D ditunjukkan pada gambar 3.24.



Gambar 3. 24 Hasil Pemodelan 2D Metode NLCG.

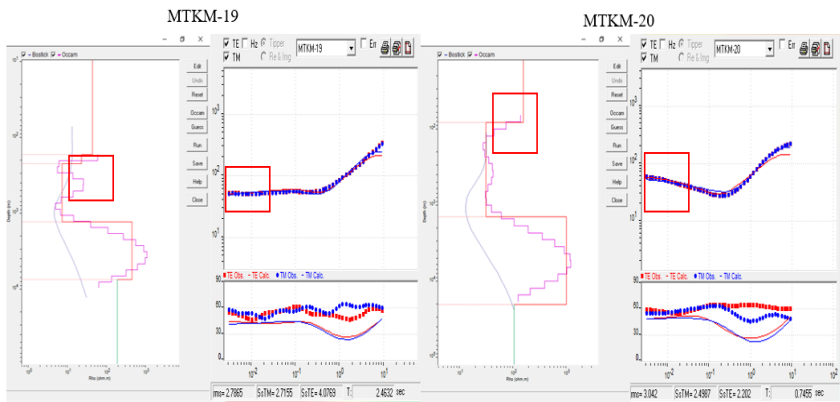
3.3.6 Pendekatan Hasil Pemodelan 1D dan 2D

Pada pengolahan data magnetotelurik, kondisi data tidak begitu stabil pada lapisan dangkal yang disebabkan perbedaan topografi yang mencolok Akibatnya, terjadi ambiguitas nilai resistivitas pada lapisan dangkal yang dikenal dengan istilah efek galvanik. Inversi 2D menggunakan algoritma NLCG dengan prinsip *finite difference* memiliki kelemahan untuk menggambarkan topografi dengan baik karena hanya dapat membuat model dengan *grid* yang sama.

Pada pemodelan lapisan dangkal, hal yang sangat mempengaruhi terjadinya ambiguitas adalah efek topografi. Pada pemodelan 1D, pengaruh topografi dapat dihilangkan dengan koreksi statik menggunakan data TDEM. Pemodelan dapat dilakukan langsung dengan kurva tanpa ada pengaruh dari blok-blok seperti yang ada pada *forward modelling* 2D. Inversi *Occam* 1D tidak berpatokan kepada model awal sedangkan inversi NLCG 2D dilakukan dengan membuat pemodelan kedepan dengan lapisan homogen. Selain itu, pada *forward modelling* NLCG 2D, model permukaan lapangan pengukuran tidak berbentuk

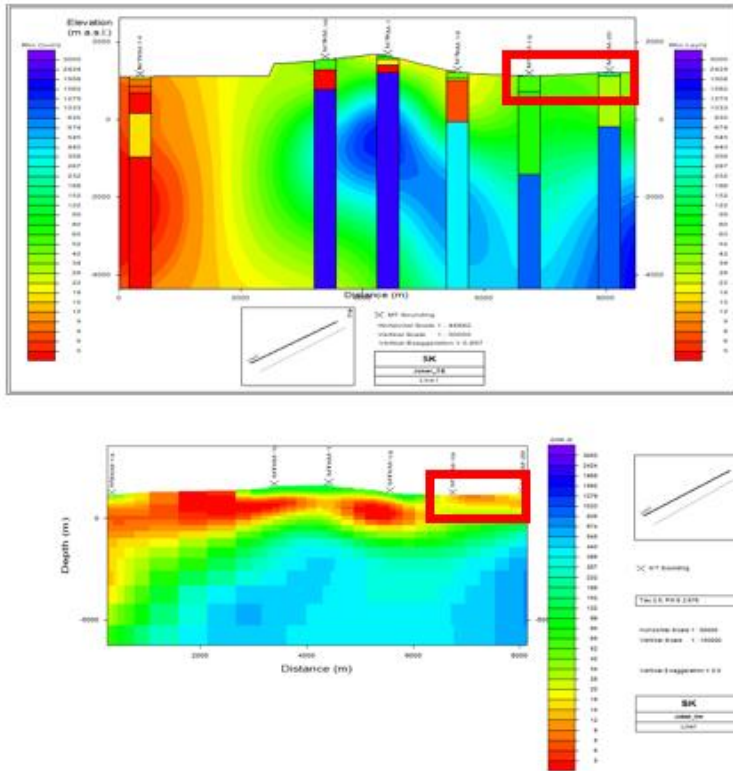
sempurna karena *forward modelling* disusun dengan bentuk blok-blok sehingga bentuknya tidak *smooth* dan efek statik tidak dapat dikoreksi dengan optimal. Oleh karena itu hasil model 1D dapat digunakan sebagai pendekatan untuk hasil model 2D.

Selain karena efek galvanik, kondisi data yang tidak ideal menjadi salah satu alasan lainnya dilakukan pendekatan pemodelan 1D dan 2D. Pada pemodelan 1D, kurva TE lebih dipercaya untuk mengidentifikasi lapisan bawah permukaan karena memiliki komponen B_z . Akan tetapi, apabila kondisi data antara kurva TE dan TM ideal, hasil pemodelan 1D tidak akan jauh berbeda. Begitu juga dengan hasil pemodelan 2D. Pemodelan 1D dan 2D tidak akan jauh berbeda apabila data dalam kondisi yang ideal. Pada penelitian ini, akan dilakukan pendekatan model 2D dengan 1D dengan membandingkan kurva pemodelan 1D dan kurva *misfit* 2D.



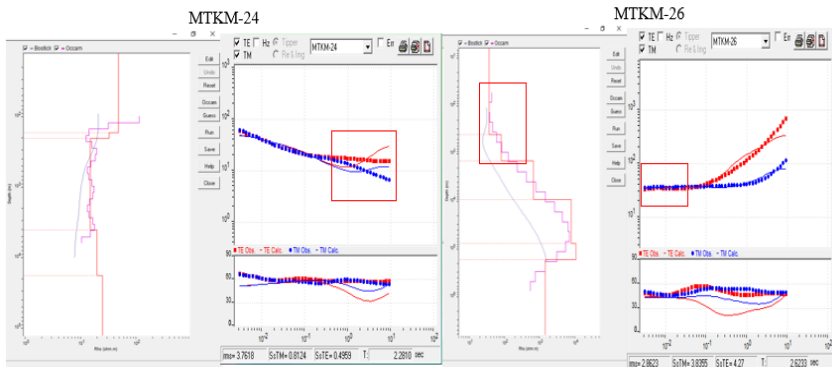
Gambar 3. 25 Perbandingan Kurva Pemodelan 1D (kiri) dan Kurva Misfit 2D (kanan) Titik MTKM-19 dan MTKM-20.

Pada *line 1*, data bisa dikatakan dalam kondisi yang ideal, sehingga jika dibandingkan kurva *misfit* pemodelan 2D dengan kurva pemodelan 1D tidak memiliki jauh perbedaan. Perbedaan terlihat pada titik MTKM-19 dan MTKM-20 dimana nilai resistivitas yang ditandai kotak merah pada gambar 3.25 memiliki nilai resistivitas yang berbeda. Gambar berikut akan memperlihatkan perbandingan antara hasil *cross section* 1D dengan model 2D.



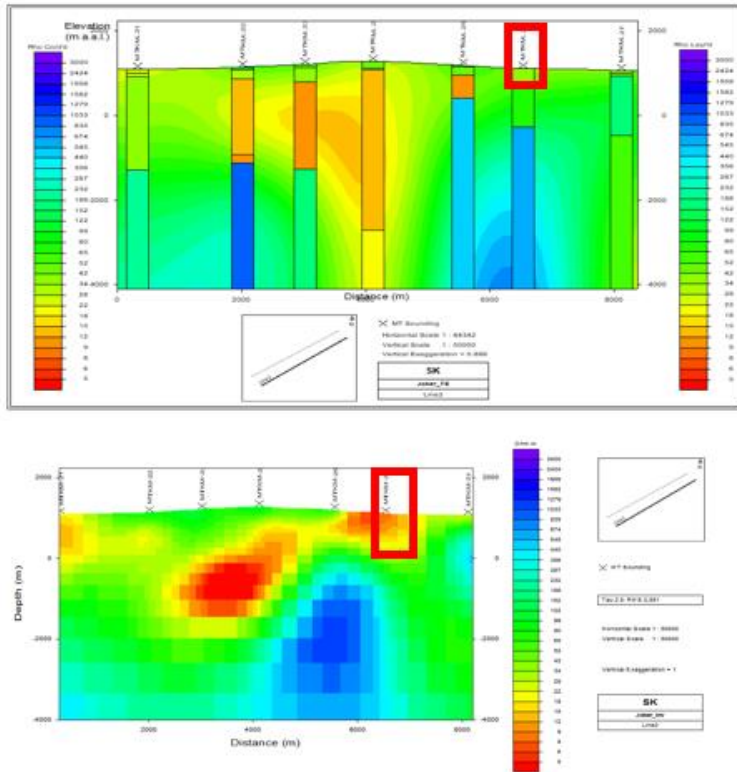
Gambar 3. 26 Perbandingan Hasil *Cross Section* (atas) dengan Model 2D (bawah) *Line 1*.

Pada *cross section mode*, ditampilkan blok vertikal hasil pemodelan 1D berdasarkan kurva dan hasil korelasi antar titik. Pemodelan 1D dan 2D pada gambar diatas memiliki *scale bar* dengan nilai yang sama. Efek galvanik terlihat pada titik MTKM-19 dan MTKM-20. Berdasarkan kurva pemodelan 1D dan kurva *misfit* 2D, daerah yang ditandai dengan kotak berwarna merah memiliki nilai resistivitas antara 70-90 Ωm . Nilai tersebut seharusnya berwarna hijau berdasarkan nilai yang ada pada *scale bar*. Hasil korelasi antar titik pada *cross section mode* memang tidak menghasilkan model 2D yang lebih detil dibandingkan dengan model 2D hasil inversi karena pada *cross section* hanya mengandalkan faktor interpolasi. Hal tersebut terlihat pada nilai resistivitas rendah yang terlihat pada blok hasil pemodelan 1D di titik MTKM-16, MTKM-17, dan MTKM-18 yang tidak tergambarkan dengan baik pada hasil korelasi. Selanjutnya, pendekatan akan dilakukan pada *line 2*.



Gambar 3. 27 Perbandingan Kurva Pemodelan 1D (kiri) dan Kurva *Misfit* 2D (kanan) Titik MTKM-24 dan MTKM-26.

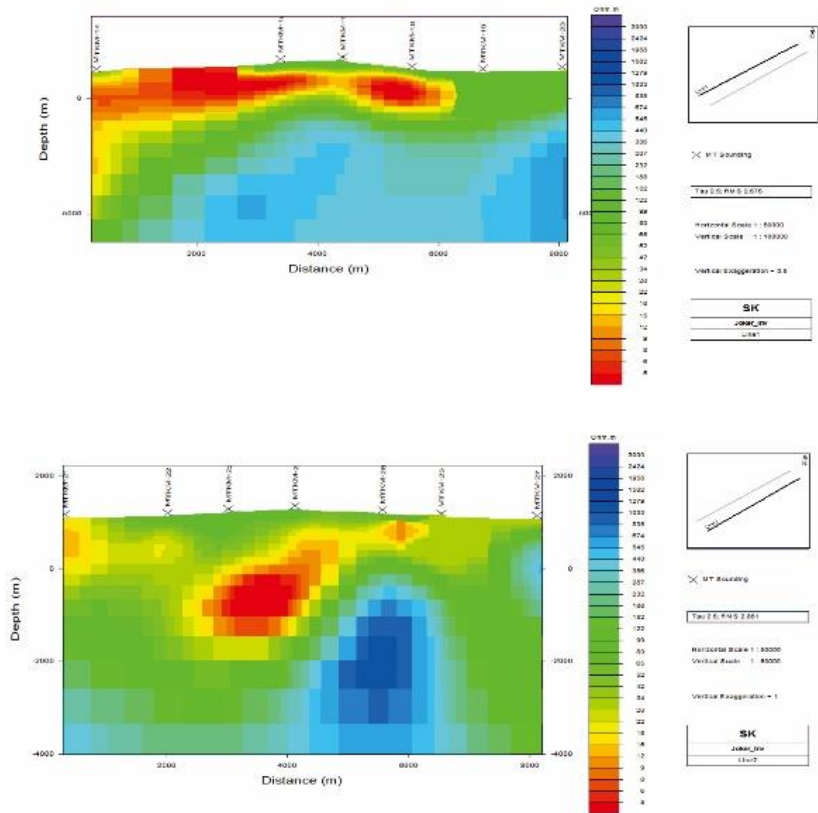
Pada *line* 2, terdapat perbedaan yang signifikan pada titik MTKM-24. Pemodelan 1D menggunakan kurva TE dimana datanya cenderung mengalami penurunan nilai resistivitas. Pada kurva *misfit* 2D, nilai resistivitas pada titik MTKM-24 mengalami kenaikan pada frekuensi 1 Hz. Akan tetapi, kenaikan nilai resistivitas tersebut masih dalam *cluster* resistivitas yang sama. Selain itu, perbedaan terlihat pada titik MTKM-26 dimana nilai resistivitas yang ditandai kotak merah pada gambar 3.26 memiliki nilai resistivitas yang berbeda. Selanjutnya akan bandingkan hasil pemodelan 2D dengan *cross section* 1D.



Gambar 3. 28 Perbandingan Hasil *Cross Section* (atas) dengan Model 2D (bawah) *Line 2*.

Efek galvanik terlihat pada titik MTKM-26, dimana pada bagian yang ditandai dengan kotak yang berwarna merah memiliki nilai resistivitas antara 35-40 Ωm berdasarkan kurva pemodelan 1D dan kurva *misfit* 2D. Nilai tersebut seharusnya berwarna hijau kekuningan berdasarkan warna pada *scale bar*. Hasil *cross section* pada *line 2* memiliki kasus yang sama dengan hasil *cross section* pada *line 1*.

Setelah dilakukan pendekatan, dilakukan pengeditan dengan cara manual dengan mengganti warna blok secara satu persatu yang mengalami efek galvanik dengan warna blok yang sesuai dengan nilai yang benar berdasarkan warna *scale bar*. Gambar 3.30 berikut adalah hasil model 2D setelah dilakukan pengeditan.



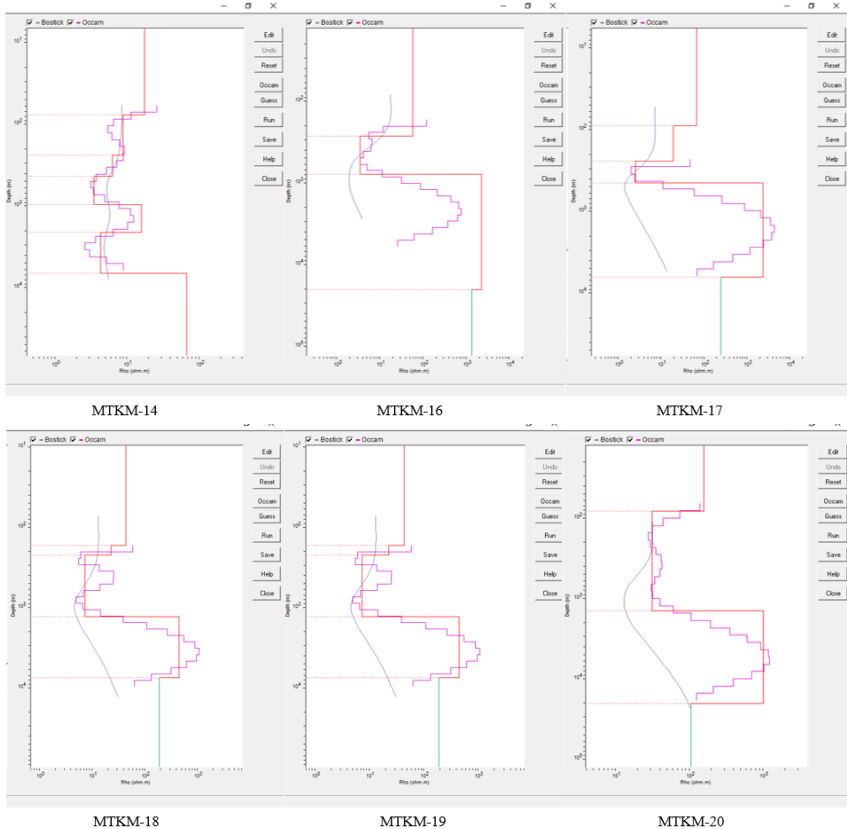
Gambar 3. 29 Hasil Model 2D Setelah Pendekatan Dengan Model 1D *Line 1* (atas) dan *Line 2* (Bawah)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pemodelan *Line 1*

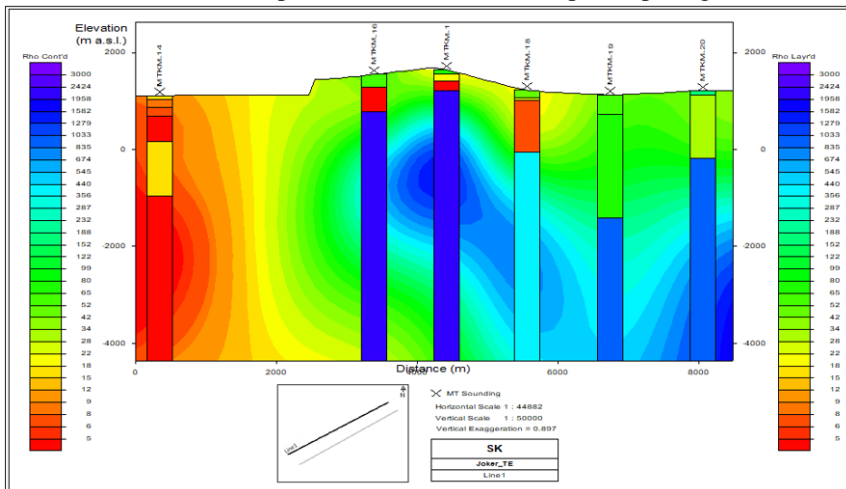
Hasil Pemodelan 1D untuk *line 1* ditampilkan pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Hasil pemodelan 1D *Line 1*.

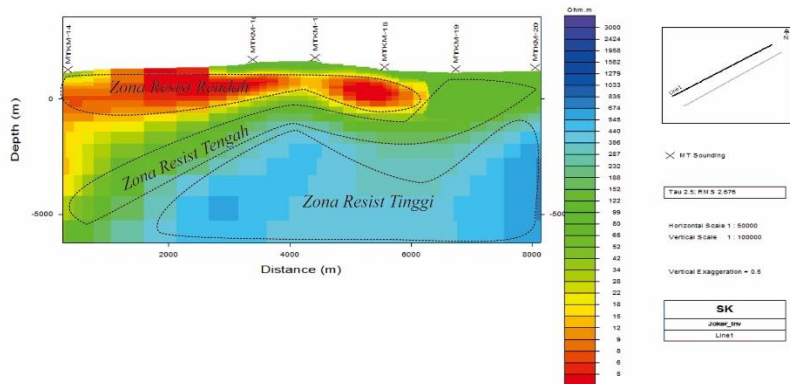
Pada titik pengukuran MTKM-14 memiliki kurva nilai resistivitas yang naik turun dan terhitung rendah serta berada pada *cluster* resistivitas yang sama yaitu 5-20 Ωm. Nilai tersebut termasuk kedalam zona resistivitas rendah. Pada titik MTKM-16 memiliki nilai resistivitas yang lebih variatif yaitu mengalami penurunan resistivitas dari 100-2 Ωm pada kedalaman 0-220 meter, mengalami kenaikan resistivitas dari 2-20 Ωm pada kedalaman 270-800 meter, dan 20-1000 Ωm pada kedalaman 800-4000 meter.

Nilai yang variatif tersebut terdapat juga pada titik MTKM-17 hingga MTKM-20. Pada titik MTKM-17 nilai resistivitas mengalami penurunan dari 20-1 Ωm pada kedalaman 0-250 meter, mengalami kenaikan dari 1-20 Ωm pada kedalaman 250-470 meter, dan 20-3000 Ωm pada kedalaman 470-4000 meter. Titik MTKM-18 mengalami penurunan nilai resistivitas dari 100-5 Ωm pada kedalaman 0-1050 meter, dan mengalami kenaikan dari 100-1100 Ωm pada kedalaman 1050-4000 meter. Titik MTKM-19 mengalami penurunan nilai resistivitas dari 100-75 Ωm pada kedalaman 0-1050 meter, dan mengalami kenaikan dari 10-1000 Ωm pada kedalaman 1150-4000 meter. Titik MTKM-20 mengalami penurunan nilai resistivitas dari 100-70 Ωm pada kedalaman 0-1050 meter, dan mengalami kenaikan dari 20-1000 Ωm pada kedalaman 1050-4000 meter. Korelasi dari hasil pemodelan 1D *line 1* ditampilkan pada gambar 4.2 .



Gambar 4. 2 Hasil Cross Section Line 1.

Berdasarkan hasil *cross section 1D line 1*, erdapat tiga zona resistivitas, yaitu zona resistivitas rendah dengan rentang nilai 5-30 Ωm , zona resistivitas tengah dengan rentang nilai 50-350 Ωm , dan zona resistivitas tinggi dengan rentang nilai >350 Ωm . Selanjutnya, akan ditampilkan hasil pendekatan model 1D dan 2D *line 1* pada gambar 4.3.

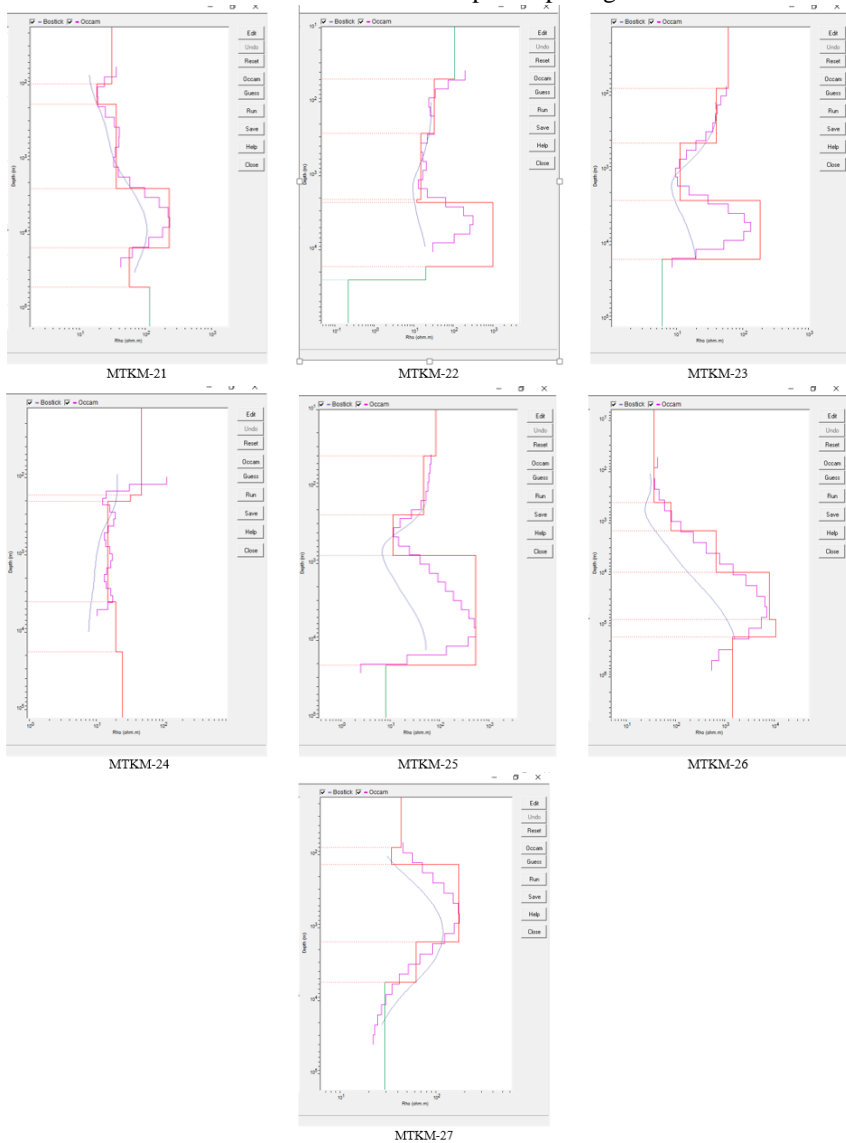


Gambar 4. 3 Hasil Pemodelan 2D *Line 1*.

Pada *line 1* terdapat lapisan resistivitas rendah dengan ketebalan 0-1500 meter dan panjang sekitar 6000 meter dengan rentang nilai resistivitas sebesar 5–30 Ωm . Kemudian terdapat lapisan dengan nilai resistivitas tengah pada kedalaman 1500-2500 meter dengan rentang resistivitas 50-350 Ωm . Selanjutnya terdapat lapisan dengan nilai resistivitas tinggi pada kedalaman 2500-4000 meter dengan rentang nilai resistivitas 350–3000 Ωm . Nilai resistivitas pada hasil pemodelan 2D memiliki *trend* yang sama dengan nilai resistivitas pada hasil pemodelan 1D, yakni resistivitas mengalami penurunan hingga peningkatan yang signifikan pada lapisan paling dalam. Zona resistivitas tinggi berada pada titik MTKM-16 hingga MTKM-18

4.2 Hasil Pemodelan *Line 2*

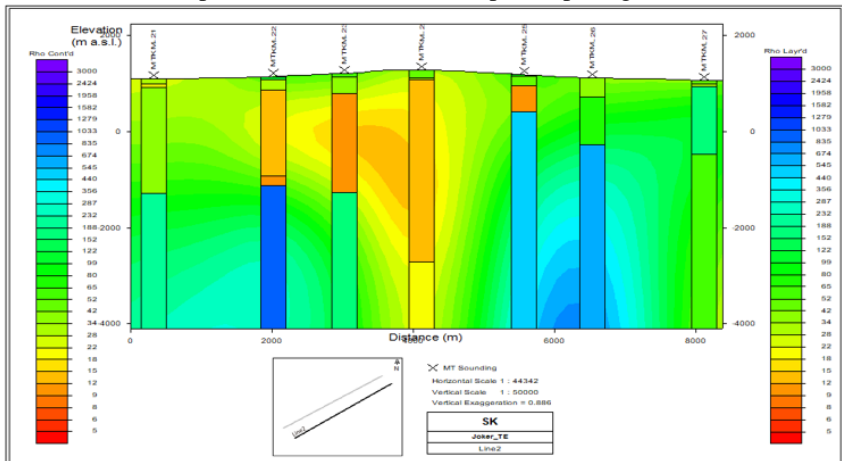
Hasil Pemodelan 1D untul *line 1* ditampilkan pada gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Hasil pemodelan 1D Occam *Line 2*.

Titik pengukuran MTKM-21 memiliki nilai resistivitas yang cenderung naik dari 20-280 Ωm pada kedalaman 0-4000 meter. Pada titik MTKM-22 mengalami penurunan nilai resistivitas dari 100-1 Ωm pada kedalaman 0-1110 meter, dan mengalami kenaikan resistivitas dari 1-400 Ωm pada kedalaman 1110-4000 meter. Pada titik MTKM-23 nilai resistivitas mengalami penurunan dari 80-1 Ωm pada kedalaman 0-1150 meter, mengalami kenaikan dari 1-200 Ωm pada kedalaman 1150-4000 meter.

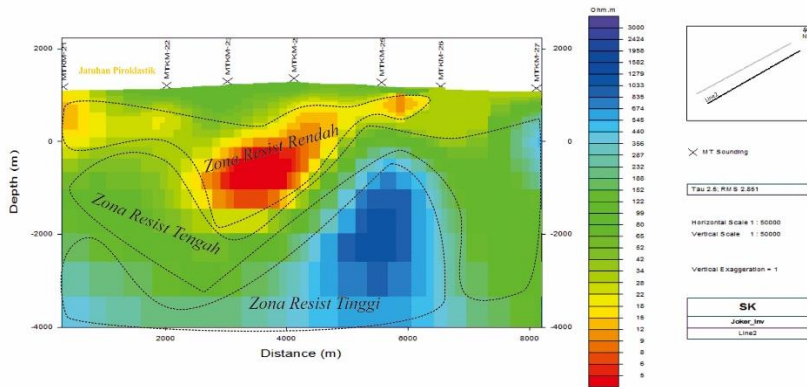
Trend data terlihat hampir mirip dari titik MTKM-16 hingga MTKM 23, yaitu mengalami penurunan nilai resistivitas atau nilai resistivitas rendah pada kedalaman 0-1000 meter dan mengalami kenaikan nilai resistivitas yang signifikan pada kedalaman 1000-4000 meter. Perbedaan yang sangat terlihat adalah pada titik MTKM-24. Pada titik MTKM 24, nilai resistivitas mengalami penurunan nilai resistivitas dari 100-1 Ωm pada kedalaman 0-4000 meter. Kemudian, *trend* data kembali seperti semula pada titik MTKM-25 dan MTKM-26. Pada titik MTKM-25, mengalami penurunan nilai resistivitas dari 40-8 Ωm pada kedalaman 0-800 meter, dan mengalami kenaikan dari 8-900 Ωm pada kedalaman 800-4000 meter. Titik MTKM-26 mengalami kenaikan nilai resistivitas dari 40-900 Ωm pada kedalaman 0-4000 meter. Pada titik MTKM-27 memiliki perbedaan *trend* kurva dari titik sebelumnya, yaitu mengalami kenaikan resistivitas dari 50-300 Ωm pada kedalaman 0-1000 meter dan mengalami penurunan resistivitas dari 300-30 Ωm pada kedalaman 1000-4000 meter. Korelasi dari hasil pemodelan 1D *line 2* ditampilkan pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Hasil *Cross Section Line 2*

Berdasarkan hasil *cross section line 2*, terdapat tiga zona resistivitas seperti pada *line 1*, yaitu zona resistivitas rendah dengan rentang nilai 5-30 Ωm , zona resistivitas tengah dengan rentang nilai 50-350 Ωm , dan zona resistivitas tinggi

dengan rentang nilai $>350 \Omega\text{m}$. Selanjutnya, akan ditampilkan hasil pendekatan model 1D dan 2D *line 2* pada gambar 4.6.



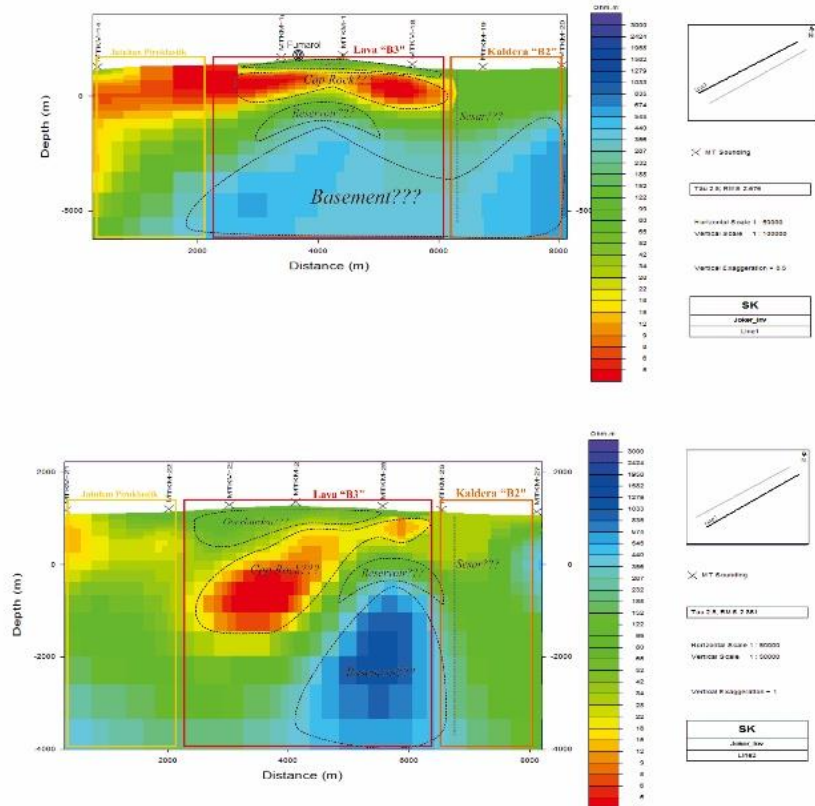
Gambar 4. 6 Hasil Pemodelan 2D *Line 2*.

Pada *line 2*, Terdapat lapisan resistivitas rendah dengan ketebalan 0-2000 meter dan panjang sekitar 6000 meter dengan rentang nilai resistivitas sebesar 5–30 Ωm . Kemudian terdapat lapisan dengan nilai resistivitas tengah pada kedalaman 2000-3000 meter dengan rentang resistivitas 50-350 Ωm . Selanjutnya terdapat lapisan dengan nilai resistivitas tinggi dengan ketebalan kurang lebih 2500 meter dengan rentang nilai resistivitas 350–3000 Ωm . Zona tersebut tepat berada pada titik MTKM-25 dan MTKM-26.

4.3 Interpretasi

Interpretasi dilakukan dengan cara integrasi hasil pemodelan dengan data geologi. Lapangan panas bumi “SK” berada pada lingkup vulkanik, yaitu terletak pada kawah gunung. Jika dilihat pada peta desain akuisisi, *line 1* membentang dari arah barat daya-timur laut yang terdapat sebuah manifestasi panas bumi berupa fumarol pada lintasannya. Lokasi fumarol tersebut tepat berada di antara titik MTKM-16 dan MTKM-17.

Selain itu, kedua lintasan melewati sebuah kelurusan sesar yang mengarah dari tenggara-barat laut. Kelurusan sesar itu tepat berada pada titik MTKM-26 dan diantara titik MTKM-18 dan MTKM-19. Pada titik MTKM-24 dan MTKM-25, terdapat manifestasi panas bumi berupa dua lokasi air panas yang berada di arah tenggara dengan jarak kurang lebih 800 meter. Lokasi air panas tersebut juga berdekatan dengan Danau “B” yang merupakan sebuah danau yang terbentuk setelah aktivitas vulkanik dari Gunung “B”. Gambar berikut akan menjelaskan interpretasi dari pengolahan data magnetotelurik lapangan pans bumi “SK”



Gambar 4. 7 Interpretasi Hasil Pemodelan 2D *Line 1* (Atas) dan *Line 2* (Bawah)

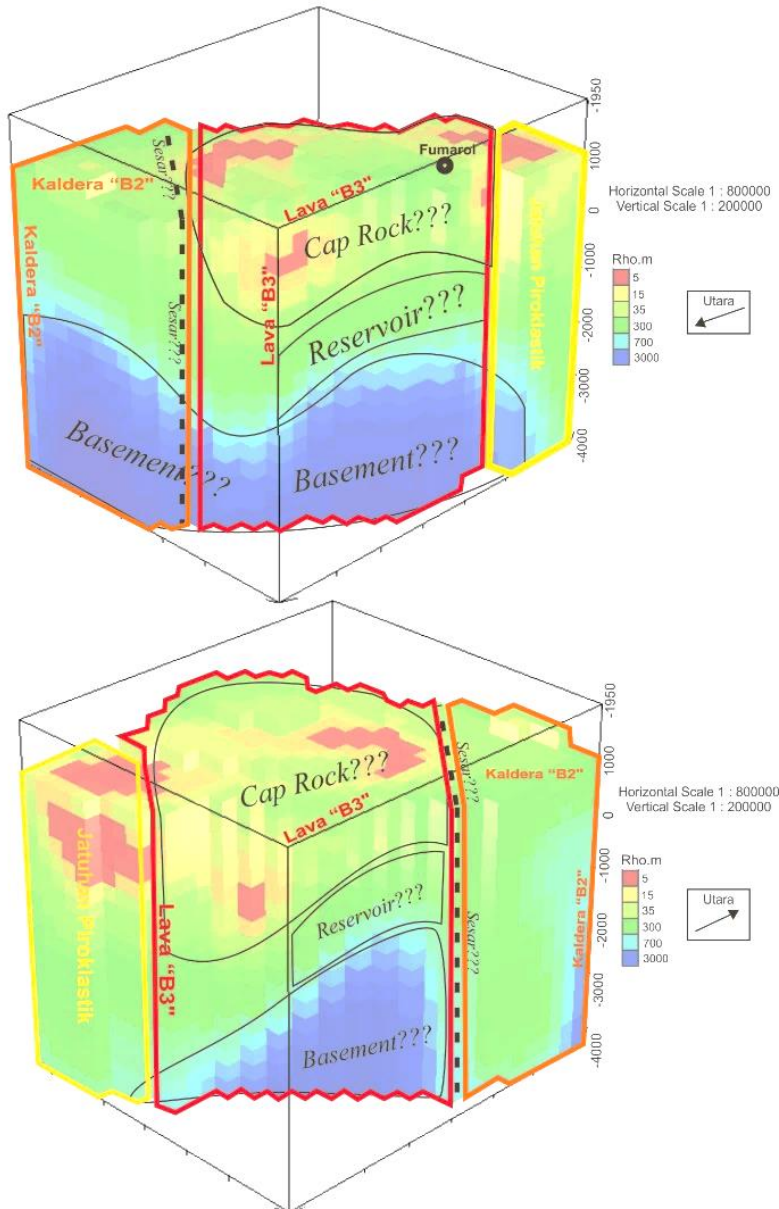
Pada gambar 4.7 dilakukan *plotting* sesar dan fumarol berdasarkan peta geologi. Fumarol pada *line 1* berada di atas lapisan dengan resistivitas rendah yang ditandai dengan warna merah tepatnya pada titik MTKM-16, MTKM-17 dan MTKM-18. Lapisan tersebut diinterpretasikan sebagai lapisan penutupung atau *cap rock*. Lapisan tersebut memiliki nilai resistivitas sebesar 5-20 Ωm yang berada pada kedalaman kurang lebih 1000 meter. Kemudian pada kedalaman 2000-2500 meter terdapat lapisan dengan rentang nilai resistivitas 150-350 Ωm . Lapisan tersebut diinterpretasikan sebagai lapisan *reservoir*. Lapisan yang sangat resistiv pada kedalaman dibawah 2500 meter diinterpretasikan sebagai lapisan *basement* atau batuan dasar dengan nilai resistivitas mencapai 3000 Ωm .

Pada bagian atas *cap rock*, terdapat lapisan yang memiliki nilai resistivitas lebih tinggi dari *cap rock* yaitu 50-80 Ωm . Lapisan tersebut diinterpretasikan sebagai lapisan *overburden* atau lapisan tanah penutup. Berdasarkan data geologi, lapisan tersusun oleh Lava andesit basaltik yang merupakan sisa-sisa dari aktivitas vulkanik Gunung “B”. Diantara titik MTKM-18 dan MTKM-19, terdapat sesar yang telah disesuaikan dengan lokasi pada peta geologi. Sesar tersebut diinterpretasikan sebagai *recharge area* untuk sistem panas bumi lapangan “SK”. Selain berdasarkan peta geologi, sesar tersebut dapat dilihat pada kontras resistivitas pada kedalaman 2500-4000 meter.

Pada *line 2*, lapisan *cap rock* terdapat pada titik MTKM-23, MTKM-24, dan MTKM-25 pada kedalaman mencapai 2000 meter. Titik MTKM-23, MTKM-24 dan MTKM-25 berdekatan dengan titik MTKM-16, MTKM-17 dan MTKM-18. Sehingga dapat diinterpretasikan bahwa lapisan *cap rock* berada di wilayah enam titik tersebut. Pada titik MTKM-24, lapisan *cap rock* berada hingga pada kedalaman 2000 meter. Hal tersebut diinterpretasikan karena posisi titik MTKM-24 berada di sekitar kawasan air panas yang terdapat di arah tenggara titik pengukuran dengan jarak kurang lebih 800 meter. Selain itu, lokasi Danau “B” juga berdekatan dengan lokasi *line 2* yaitu berjarak kurang lebih 1,5 kilometer. Karena kondisi geografis tersebut, diinterpretasikan adanya intrusi air dari danau yang menyebabkan nilai resistivitas di sekitar titik MTKM-24 pada kedalaman yang lebih dari 1500 meter memiliki nilai resistivitas yang rendah. Karena itulah data pada titik MTKM-24 memiliki kondisi yang tidak ideal.

Lapisan *reservoir* pada *line 2* terdapat pada titik MTKM-25 di kedalaman 1500 meter dengan rentang nilai resistivitas 150-350 Ωm . Sesar sebagai *recharge area* terdapat diantara titik MTKM-25 dan MTKM-26. Sesar tersebut digambarkan dengan kontras resistivitas yang sangat jelas diantara kedua titik tersebut. Pada titik MTKM-25 di kedalaman 2000-4000 meter, terdapat lapisan yang sangat resistif dengan nilai resistivitas mencapai 3000 Ωm . Lapisan tersebut diinterpretasikan sebagai *basement* atau batuan dasar yang terangkat karena aktivitas dari sesar. Gambar 4.8 akan memperlihatkan hasil gabungan model 2D *line 1* dan *line 2* dalam bentuk volumetrik yang menjelaskan sistem panas bumi pada lapangan “SK”.

Lapangan Panas Bumi "SK"



Gambar 4. 8 Gabungan Model 2D *Line 1* dan *Line 2* dalam Bentuk Volumetrik.

Sistem panas bumi terdapat pada wilayah sekitar MTKM-16, MTKM-17, MTKM-18, MTKM-23, MTKM-24, dan MTKM-25. Berdasarkan peta geologi, daerah tersebut berada dalam satu formasi yaitu formasi Lava “B3”. Lava “B3” merupakan Satuan yang tersingkap di bagian dalam Kaldera “B2”. Titik MTKM-14, MTKM-21, dan MTKM-22 berada pada formasi yang berbeda yaitu pada formasi Jatuhan Piroklastik. Pada daerah tersebut memiliki resistivitas yang tergolong rendah yaitu 5-100 Ω m. Berdasarkan data geologi, formasi tersebut tersusun dari jatuhan debu vulkanik berukuran pasir kasar – halus membentuk laminasi sejajar dengan ketebalan >10 cm. Titik MTKM-19, MTKM-20, MTKM-26, dan MTKM-27 di interpretasikan sebagai batas dari sistem panas bumi lapangan “SK” karena memiliki nilai resistivitas yang tinggi dari lapisan dangkal hingga lapisan dalam. Berdasarkan data geologi, daerah tersebut berada pada formasi Kaldera “B2” yang tersusun dari lava andesit-basal. Selain itu, hal yang dapat diinterpretasikan bahwa daerah tersebut adalah batas sistem panas bumi yaitu keterdapat sesar yang mengarah dari tenggara-barat laut pada titik MTKM-19 dan MTKM-26.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang di dapatkan berdasarkan tujuan pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Pemodelan 1D dengan metode *Occam* menggunakan kurva TE menghasilkan model berupa kurva nilai resistivitas dengan rentang nilai 1-3000 Ωm berbanding dengan kedalaman sedalam 4000 meter.
2. Pemodelan 2D dengan metode NLCG yang menghasilkan model 2D dengan nilai *RMS error* 2,676 untuk *line 1*, dan 2,851 untuk *line 2*.
3. Pendekatan hasil pemodelan 1D dan 2D dilakukan dengan membandingkan hasil kurva pemodelan 1D dan kurva *misfit* 2D. Terdapat efek galvanik pada model 2D di titik MTKM-19, MTKM-20 dan MTKM-26 pada kedalaman kurang lebih 500 meter. Pengeditan model 2D dilakukan secara manual dengan mengganti warna pada blok yang mengalami efek galvanik sesuai dengan nilai yang benar pada kurva *misfit* 2D dan kurva pemodelan 1D. Nilai resistivitas dan warna dilihat dari perbandingan hasil *cross section 1D* dan model 2D pada *scale bar* yang sama.
4. Sistem panas bumi lapangan “SK” berada pada wilayah formasi Lava “B3” yang terdiri dari lapisan *cap rock* dengan nilai resistivitas 5-20 Ωm pada kedalaman 1000-2000 meter, lapisan *reservoir* dengan nilai resistivitas 150-350 Ωm di kedalaman 2000-2500 meter. Kemudian, terdapat kelurusan sesar di wilayah titik MTKM-19 dan MTKM-26 yang terlihat pada kontras resistivitas pada hasil pemodelan.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan pengembangan terhadap perangkat lunak *WinGLink* terutama pada pemodelan 1D dengan metode *Occam* yang memiliki kelemahan pada identifikasi nilai resistivitas pada frekuensi rendah. Selain pada pemodelan 1D, pemodelan 2D juga dibutuhkan pengembangan agar tidak terjadi efek galvanik pada lapisan yang dangkal.
2. Identifikasi sistem panas bumi akan lebih optimal jika diintegrasikan dengan data penunjang lainnya seperti data penelitian geofisika dengan metode yang berbeda, dan sampel geokimia pada lapangan pengukuran agar hasil interpretasi lebih lebih akurat dengan paramter yang lebih kompleks.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Aster, R.C., Borchers, B. dan Thurber, C.H. (2005), *Parameter Estimation and Inverse Problems*, Elsevier, New York.
- Constable, S.C. dan Parker, R.L. (1987), "Occam Inversion: A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from EM Sounding Data", *Geophysics*, Vol.52, hal. 289–300.
- Daud, Y. (2010), *Metode Magnetotelurik*, Laboratorium Geofisika FMIPA Universitas Indonesia, Jakarta.
- Dipipo, R. (2005), *Geothermal Power Plants*, Elsevier, New York.
- Gaffar, E.Z., Wardhana, D.D. dan Widarto, D.S. (2007), "Studi Geofisika Terpadu di Lereng Selatan G. Ungaran Jawa Tengah dan Implikasinya terhadap Struktur Panas Bumi", *Jurnal Meteorologi Geofisika*, hal. vol 8 No. 2.
- Grandis, H. (2013), *Metode Magnetotelurik*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Grandis, H. (2009), *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Bandung.
- Jiraceek, G.R. (2007), *The Magnetotelluric Methode*, San Diego, San Diego State University.
- Jupp, D.L. dan Vozoff, K. (1977), "Two-Dimensional Magnetotelluric Inversion", *Geophysical Journal International*, Vol.50, No.2, hal. 333–352.
- Kauffman, A. dan Keller, G. V (1981), *The Magnetotelluric Sounding Method*, Elsevier, New York.
- PSDMBP (2012), *Dokumen Internal Data Geologi Regional*, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Bandung.
- Rodi, W. dan Mackie, R.L. (2001), "Nonlinier Conjugate Gradient Algorithm for 2D Magnetotelluric Inversion", *Geophysics*, hal. 174–187.
- Simpson, F. dan Bahr, K. (2005), *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, New York.
- Syhwanti, H., Arman, Y., Ivansyah, O. dan Kholid, M. (2014), "Aplikasi Metode Magnetotelurik untuk Pendugaan Reservoir Panas Bumi Studi

Kasus Daerah Mata Air Panas Cubadak, Sumatera Barat", *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, hal. vol. 4 No. 2.

Telford, W.R., Geldart, L.P. dan Sheriff, R.E. (1990), *Applied Geophysics Second Edition*, Cambridge University Press, New York.

Vozoff, K. (1986), *Magnetotelluric Methods*, Society of Exploration Geophysicist, Oklahoma.

Wibowo, M.G.A. (2013), "Pendekatan Inversi 1D Untuk Mengurangi Efek Galvanic Pada Model 2D Magnetotelurik Daerah Panas Bumi Danau Ranau", *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, Vol.8, hal. 2.

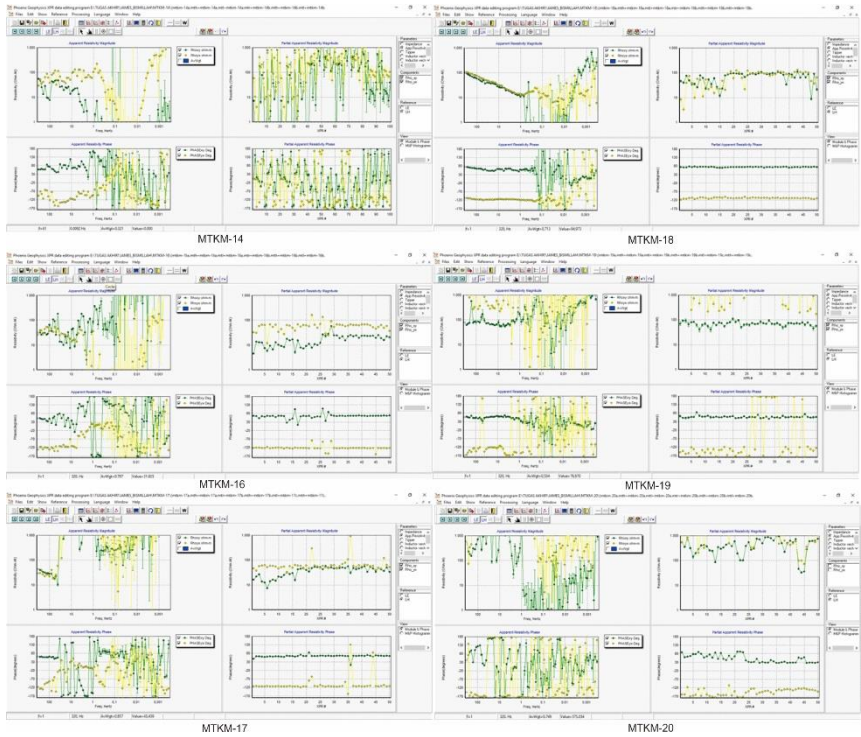
Wijaya, R.A.K., Bahri, A.S., Warnana, D.D. dan Darmawan, A. (2016), "Inversi 1-D Pada Data Magnetotellurik di Lapangan X Menggunakan Metode Occam dan Simmulated Annaeling", *Jurnal Geosaintek*, Vol.2 no. 2, hal. 75–80.

Zakaria, M.F. (2013), *Interpretasi Data Magnetotellurik pada Area Panas Bumi Lili, Sulawesi Barat*, Teknik Geofisika ITB, Bandung.

LAMPIRAN

1. Raw Data

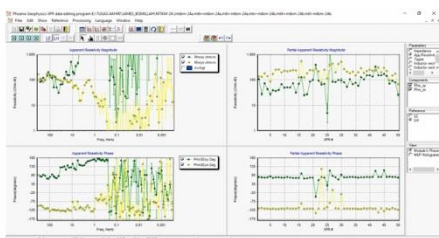
a. Sebelum Crosspower Correction



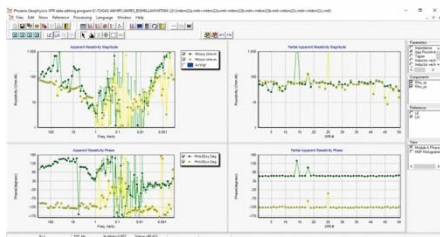
Gambar 1 Raw Data Line 1 Sebelum Crosspower Correction



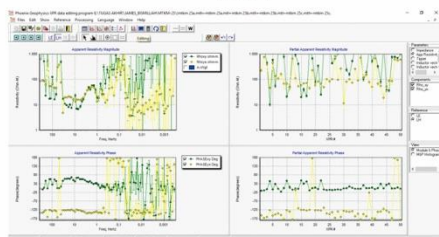
MTKM-21



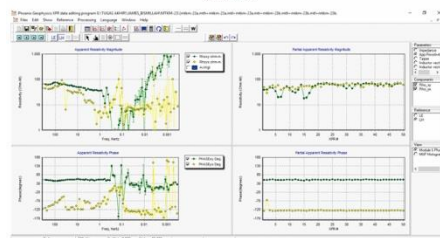
MTKM-24



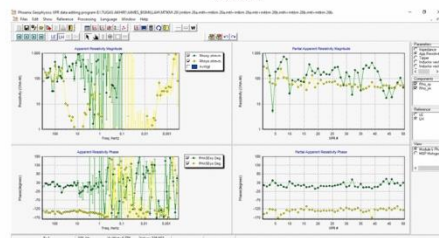
MTKM-22



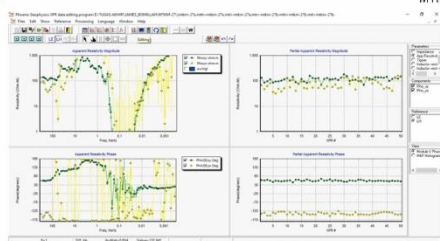
MTKM-25



MTKM-23



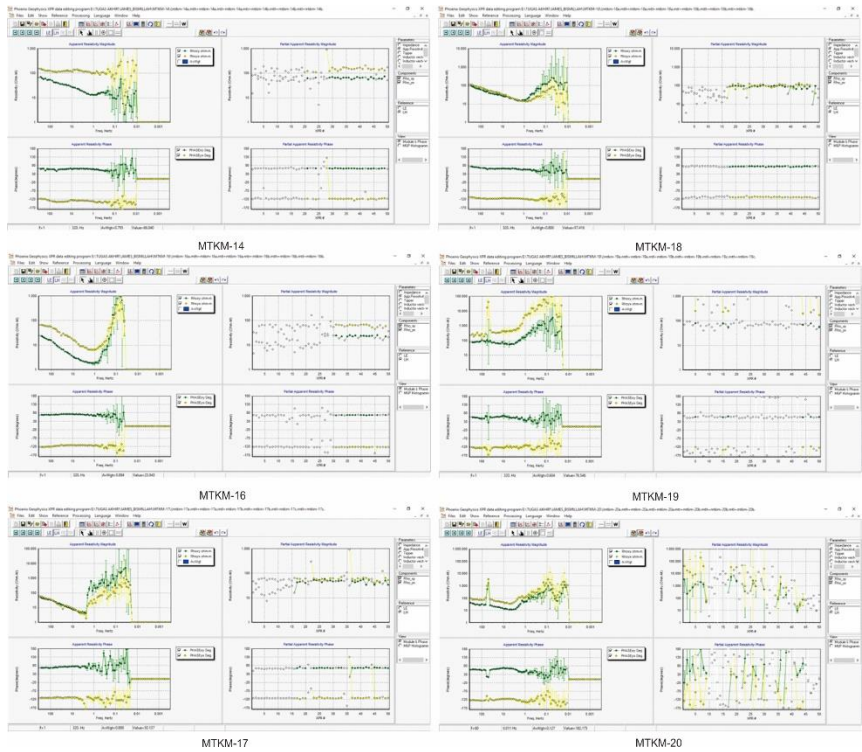
MTKM-26



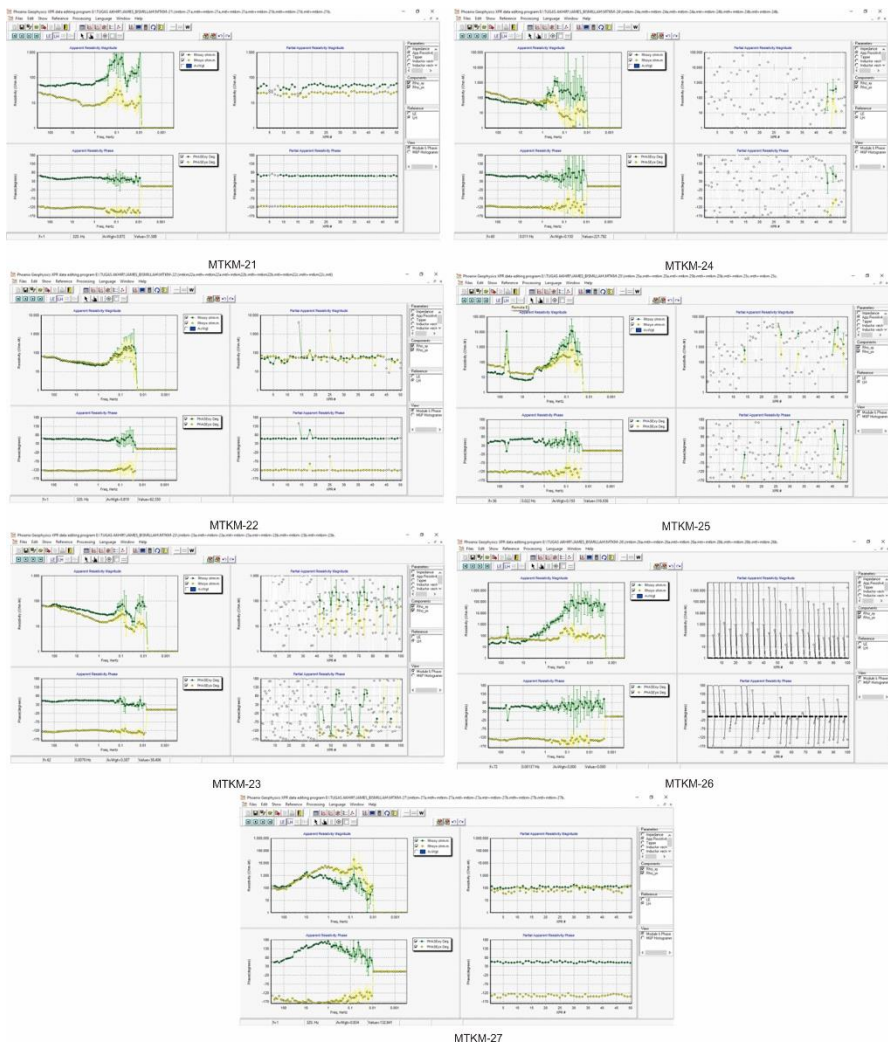
MTKM-27

Gambar 2 Raw Data Line2 Sebelum Crosspower Correction

b. Setelah Crosspower Correction

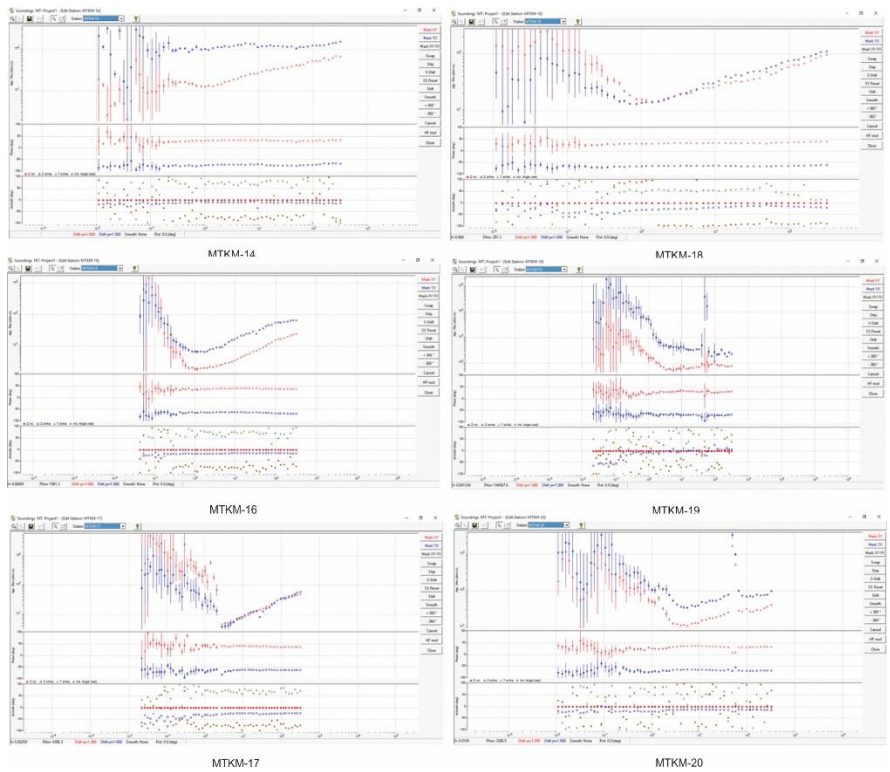


Gambar 3 Raw Data Line 1 Setelah Crosspower Correction

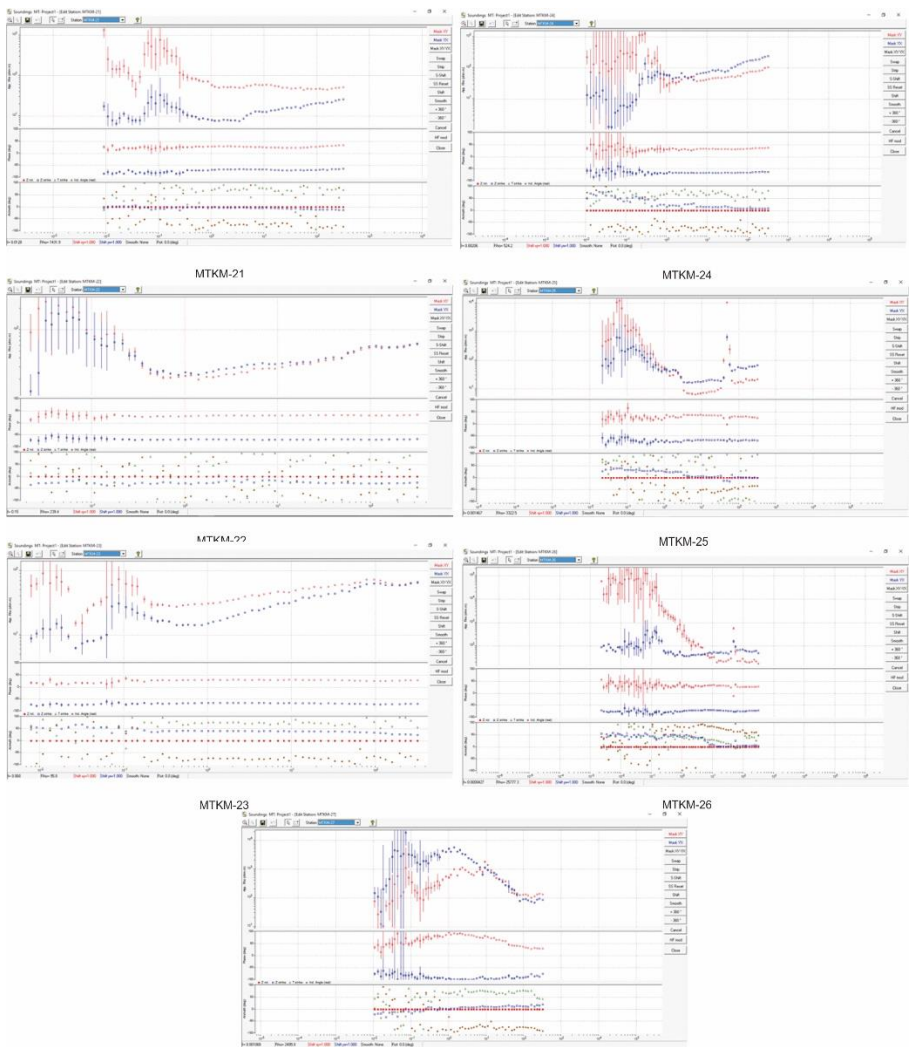


Gambar 4 Raw Data Line 2 Setelah Crosspower Correction

c. Sebelum *Smoothing* dan *Static Shift Correction*

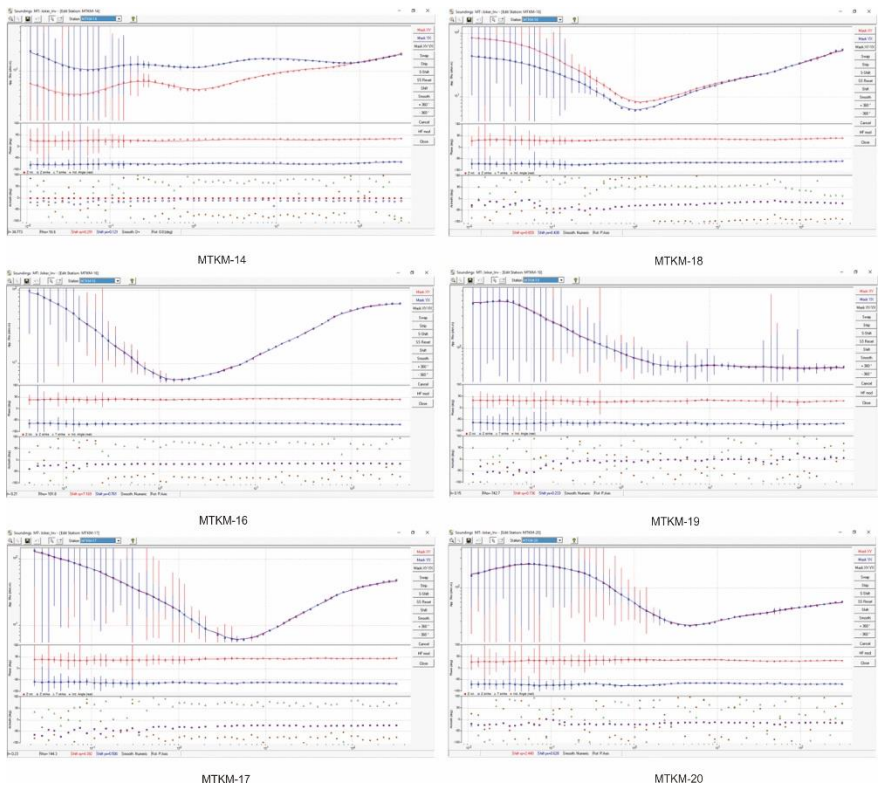


Gambar 5 Raw Data Line 1 Sebelum *Smoothing* dan *Static Shift Correction*

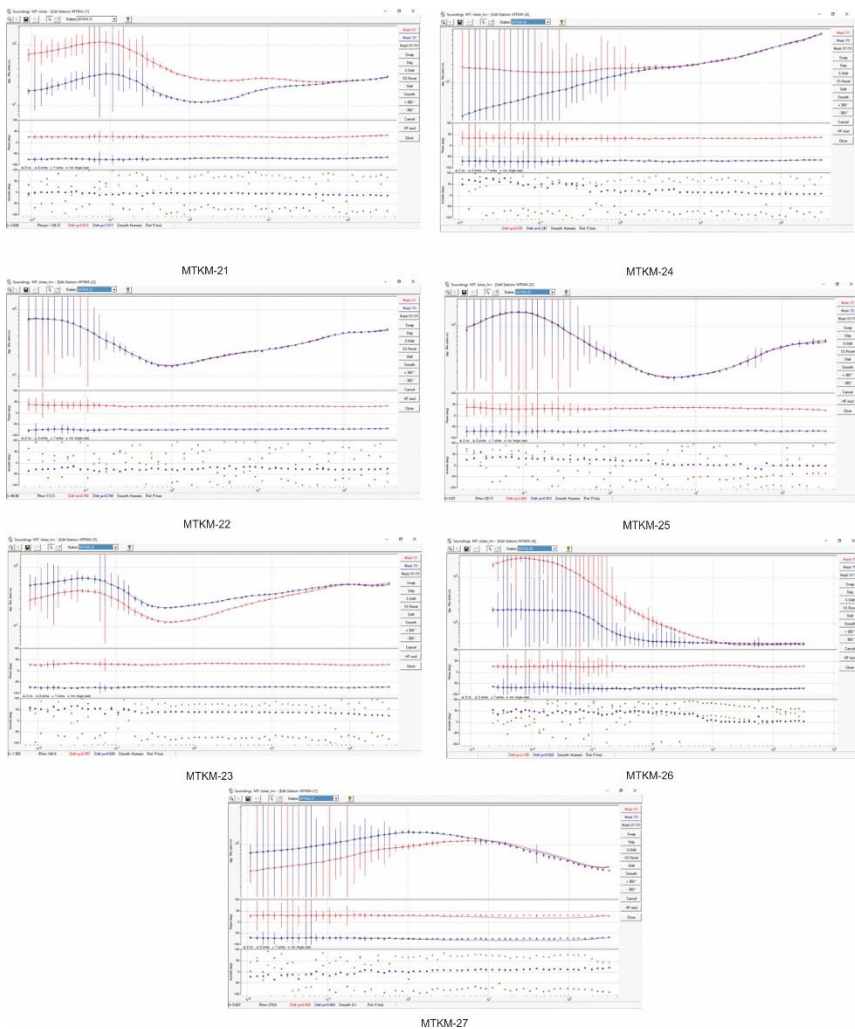


Gambar 6 Raw Data Line2 Sebelum Smoothing dan Static Shift Correction

d. Setelah *Smoothing* dan *Static Shift Correction*

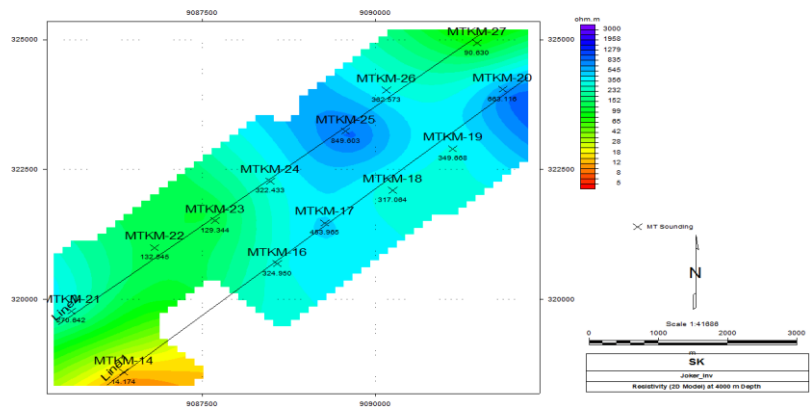


Gambar 7 Raw Data Line 1 Setelah *Smoothing* dan *Static Shift Correction*

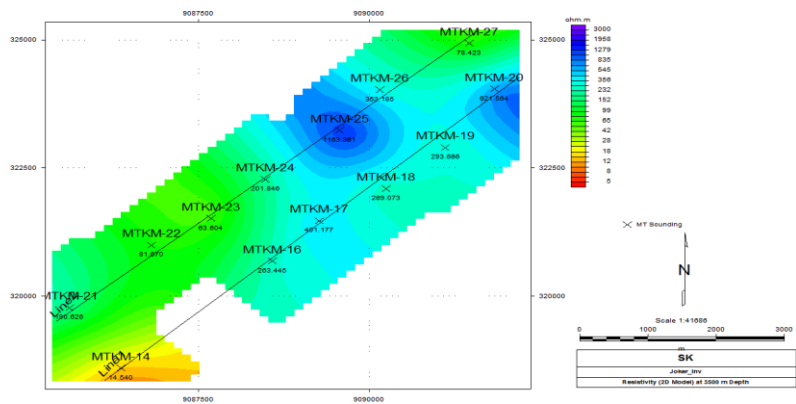


Gambar 8 Raw Data Line 2 Setelah Smoothing dan Static Shift Correction

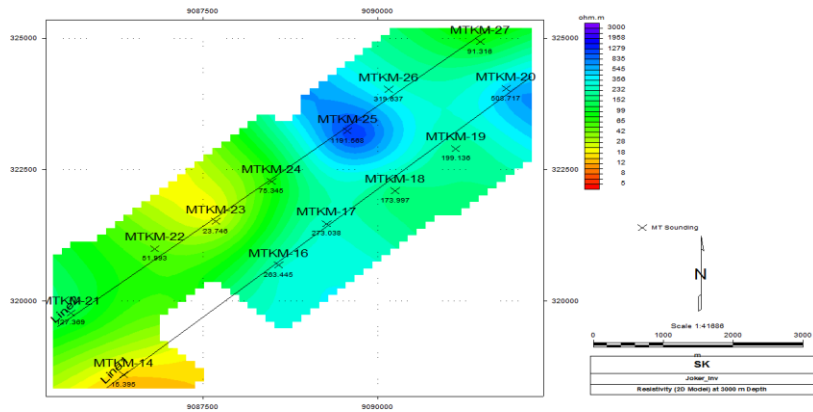
2. Peta Nilai Resistivitas per kedalaman



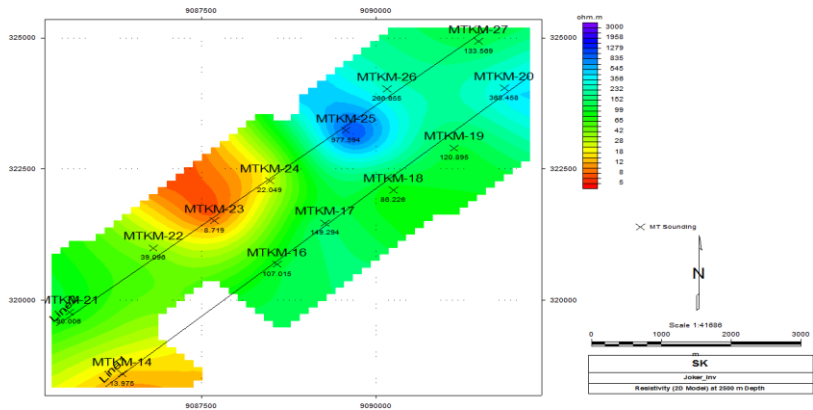
Gambar 9 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 4000 meter



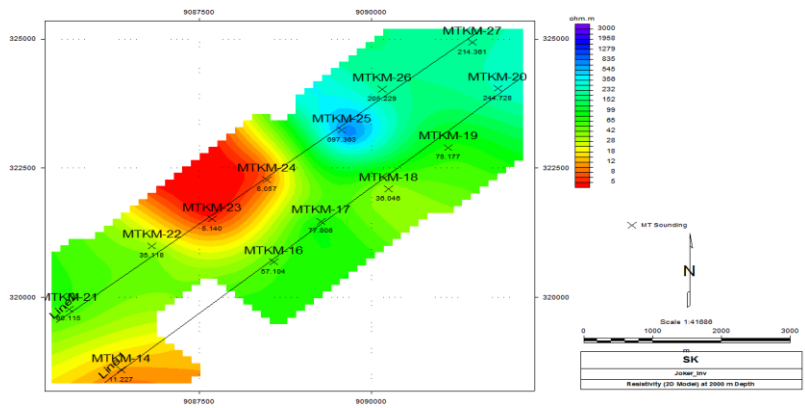
Gambar 10 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 3500 meter



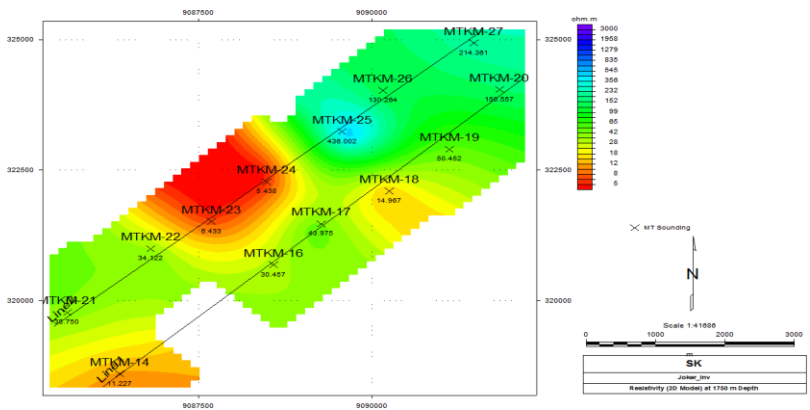
Gambar 11 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 3000 meter



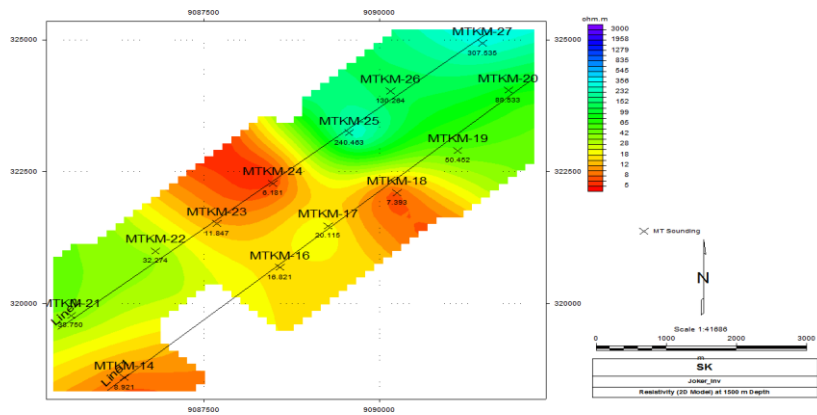
Gambar 12 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 2500 meter



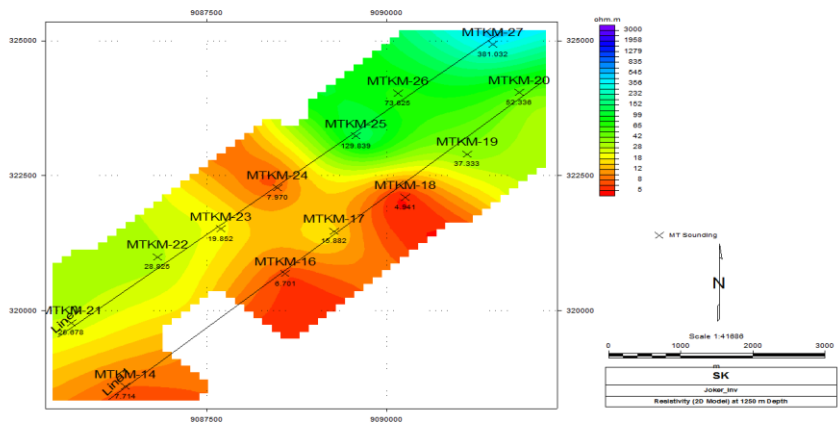
Gambar 13 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 2000 meter



Gambar 14 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 1750 meter



Gambar 15 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 1500 meter



Gambar 16 Peta Nilai Resistivitas Kedalaman 1250 meter

PROFIL PENULIS



Andre Maries Jasman lahir di Padang, 4 April 1996 dari pasangan Bapak Jasman dan Ibu Mardiah. Penulis merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Pendidikan formal penulis dimulai di SD Semen Padang (2002-2006), kemudian melanjutkan sekolah di SMPN 8 Padang (2006-2008), kemudian SMAN 1 Padang (2011-2014), terakhir penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama Menjadi mahasiswa di ITS, penulis aktif dalam kegiatan organisasi, diantaranya pernah menjadi staff departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS (HMTG ITS) periode 2015-2016, staff *External Department Society of Exploration Geophysicist ITS Student Chapter* (SEG ITS-SC) periode 2015/2016, ketua departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS (HMTG ITS) periode 2016-2017, ketua *External Department Society of Exploration Geophysicist ITS Student Chapter* (SEG ITS-SC) periode 2016/2017 dan anggota Komunitas Pecinta Alam ZWAGERI HMTG-ITS periode 2015-2016. Penulis juga memiliki pengalaman melaksanakan kerja praktek dan tugas akhir di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) Bandung. Jika ingin berdiskusi lebih jauh mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi email: andremjames.amj@gmail.com.